



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

KOMPLEXNÍ PEVNOSTNÍ NÁVRH KONDENZÁTORU

COMPLEX STRENGTH DESIGN OF CONDENSER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Denk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Lošák, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: Bc. Jakub Denk
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Pavel Lošák, Ph.D.
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Komplexní pevnostní návrh kondenzátoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce bude komplexní pevnostní návrh kondenzátoru. Tento návrh bude sestávat jednak z tepelně-hydraulického návrhu kondenzátoru v softwaru HTRI, jehož výstupy ve formě teplotních polí budou dále využity pro pevnostní ověření kondenzátoru metodou konečných prvků. Tento přístup bude porovnán s konvenčním řešením takovýchto úloh. V dalším kroku bude pevnost kondenzátoru dále ověřena v softwaru Sant' Ambrogio.

Cíle diplomové práce:

Provedení rešerše z dané oblasti
Tepelně-hydraulický návrh v softwaru HTRI
Pevnostní návrh v programu Sant' Ambrogio
Vytvoření konečnoprvkového modelu v softwaru ANSYS, Inc.
Zpracování dané analýzy a vyhodnocení výsledků
Návrhy pro budoucí práci

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 13445-3. Netopené tlakové nádoby - Část 3: Konstrukce a výpočet. Praha: Český normalizační institut, 2015.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá komplexním pevnostním návrhem parního kondenzátoru. Cílem práce je provést pevnostní výpočty vybraného provozního stavu, poskytnout představu o možnostech řešení, doporučení a také upozornit na úskalí těchto výpočtů. Tepelně-hydraulický výpočet kondenzátoru je proveden v softwaru HTRI. Pevnostní výpočty se řídí normou ČSN EN 13445. Nejprve je proveden pevnostní výpočet v softwaru ANSYS Workbench, zohledňující také teplotní zatížení. Pevnostní výpočet je v dalším kroku proveden také v softwaru Sant' Ambrogio. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky výpočtů a poskytnuty návrhy pro možnou navazující práci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Parní kondenzátor, tepelně-hydraulický výpočet, teplotní analýza, teplotní pole, pevnostní výpočet, MKP analýza, kategorizace napětí, ČSN EN 13445, HTRI, ANSYS, Sant' Ambrogio.

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on strength design of steam condenser. The goal of the thesis is to make strength calculations for the specific operation conditions, introduce possible solutions, provide recommendations and refer to weak points of such calculation procedures. First, thermal-hydraulic design in HTRI software is performed. Strength calculations respect ČSN EN 13445 standard. Strength calculation with imported temperature field is performed in ANSYS Workbench software. In the next step, another strength calculation is realized in Sant' Ambrogio software. Results are evaluated in conclusion chapter, including recommendations for the possible following work.

KEY WORDS

Steam condenser, thermal-hydraulic calculation, temperature analysis, temperature field, strength calculation, FEM analysis, stress categorisation, ČSN EN 13445, HTRI, ANSYS, Sant' Ambrogio.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DENK, J. *Komplexní pevnostní návrh kondenzátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Lošák, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Komplexní pevnostní návrh kondenzátoru*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu zdrojů, jenž je součástí této práce.

v Brně dne

.....

Jakub Denk

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu práce Ing. Pavlu Lošákovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení při vypracování diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat rodině, zejména rodičům, za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

OBSAH.....	13
Úvod.....	15
1 Proces výměny tepla	16
1.1 Princip výměny tepla	16
1.2 Zařízení na výměnu tepla	17
1.3 Kondenzace a zařízení s ní spojená	21
1.3.1 Kondenzace	21
1.3.2 Kondenzátor	21
1.3.3 Směšovací kondenzátory	21
1.3.4 Povrchové kondenzátory	22
2 Parní kondenzátor.....	28
2.1 Zadané parametry	28
3 Tepelně-hydraulický návrh v softwaru HTRI	31
3.1 Základní informace.....	31
3.2 Výsledky tepelně-hydraulického výpočtu	31
3.3 Výpočet teploty na vnějším povrchu trubek.....	34
3.4 Výpočet rozložení teplot pro jednotlivé řady trubek daného chodu.....	34
4 Základní informace týkající se návrhu zařízení	36
4.1 Předpisy při návrhu zařízení	36
4.1.1 Obecně.....	36
4.1.2 ČSN EN 13445 Netopené tlakové nádoby.....	37
4.2 Metoda konečných prvků	42
Přístupy k řešení přímé úlohy obecné pružnosti	42
4.3 Software ANSYS Workbench	44
5 Pevnostní výpočet kondenzátoru.....	45
5.1 Postup výpočtu	45
5.2 Výpočtový model	45
5.3 Teplotní analýza	47
5.3.1 Vstupní parametry	47
5.3.2 Výsledky teplotní analýzy	49
5.4 Přístup při řešení pevnostního výpočtu	49
5.4.1 Obecně.....	49
5.4.2 Kategorizace napětí	50
5.5 Pevnostní výpočet pro NPP1	52
5.5.1 Vstupní parametry	52

5.5.2	Výsledky statické analýzy pro NPP1.....	55
5.5.3	Oblast 1 – spoj hrdla N1 s torosférickým dnem	57
5.5.4	Oblast 2 – plášť kondenzátoru.....	59
5.5.5	Oblast 3 – místo spojení pláště a sedlové podpory.....	61
5.5.6	Oblast 4 – trubkovnice.....	65
5.5.7	Oblast 5 – plášť komory	67
5.5.8	Oblast 6 – místo spojení hrdla N2, N3 s pláštěm komory	69
5.5.9	Oblast 7 – trubkový svazek	73
6	Pevnostní ověření kondenzátoru v softwaru Sant' Ambrogio.....	76
7	Vyhodnocení výsledků, návrhy pro budoucí práci	76
8	Závěr.....	77
	Seznam použitých zdrojů	78
	Seznam symbolů a veličin.....	80
	Seznam obrázků	82
	Seznam tabulek	83
	Seznam příloh.....	84

Úvod

Přenos tepla je významný děj, který neodmyslitelně patří k průmyslové praxi. Setkat se s ním můžeme například v chemickém nebo potravinářském průmyslu, v elektrárnách nebo také v domácnostech. Tepelné výměníky jsou zařízení sloužící k přenosu tepla. V současnosti existuje široká škála tepelných výměníků nalézajících uplatnění v mnoha technologických procesech. Popis a rozdělení těchto zařízení je uvedeno v následujících kapitolách.

Tato diplomová práce se zabývá pevnostním návrhem parního kondenzátoru. Jedná se o zařízení sloužící k přenosu tepla s fázovou přeměnou. V úvodní části práce je teoreticky představena problematika výměny tepla, následně jsou popsána nejčastěji používaná zařízení. Poté jsou představena zařízení související s kondenzací – kondenzátory. V další kapitole jsou zmíněny zadané parametry kondenzátoru, ze kterých se vychází při výpočtech.

Vlastní část práce představuje provedení tepelně-hydraulického návrhu kondenzátoru v softwaru HTRI. Výstupy tohoto výpočtu jsou součástí vstupních dat pro pevnostní návrh zařízení. Ten je složen z více kroků. Model zařízení je v softwaru ANSYS Workbench 17.2 analyzován metodou konečných prvků (MKP) a vyhodnocen dle ČSN EN 13445-3, přílohy C – návrh na základě analýzy – metody založené na kategorizaci napětí. Výsledky jsou dále porovnány s běžným řešením takových úloh, tedy výpočtem dle téže normy s využitím analytických vztahů. Tento výpočet byl proveden s využitím komerčně využívaného softwaru Sant' Ambrogio.

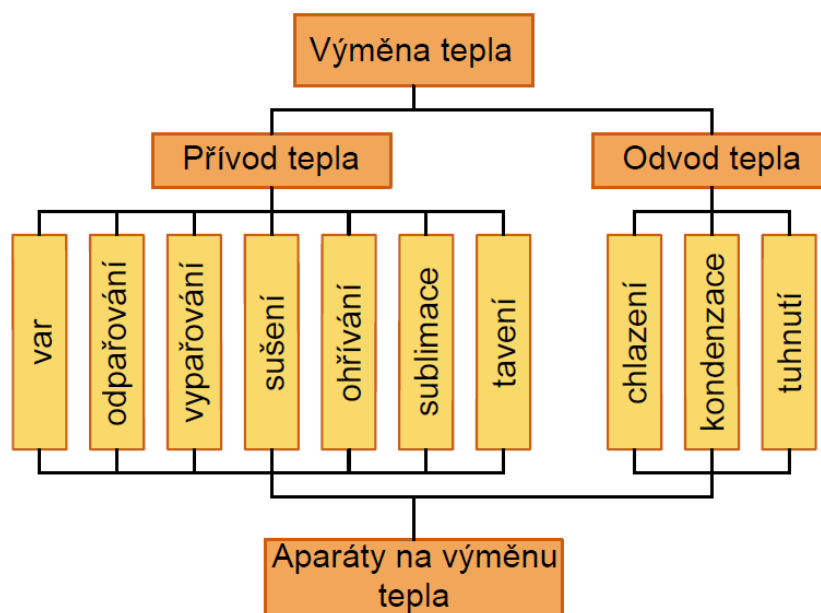
Motivací pro tuto diplomovou práci bylo provést komplexní pevnostní návrh kondenzátoru. Teplotní pole v kondenzátorech může být značně nerovnoměrné, a tato nerovnoměrnost nebývá v návrhových a pevnostních výpočtech uvažována. Při velkých teplotních gradientech nastává riziko působení nezanedbatelných přídavných napětí na trubkovnici. Vlastním přínosem této práce je provést detailní výpočet teplotního pole a následně jej aplikovat na model s využitím metody konečných prvků. V závěru práce je provedeno zhodnocení dosažených výsledků, diskutovány nejistoty ve výpočtech a navrženy doporučení pro optimální provedení pevnostního výpočtu.

1 Proces výměny tepla

1.1 Princip výměny tepla

Teplo je jedna z forem energie. K výměně tepla dochází při rozdílu teplot [1]. Podle druhého termodynamického zákona předává teplejší látka energii ve formě tepla chladnější látce [2].

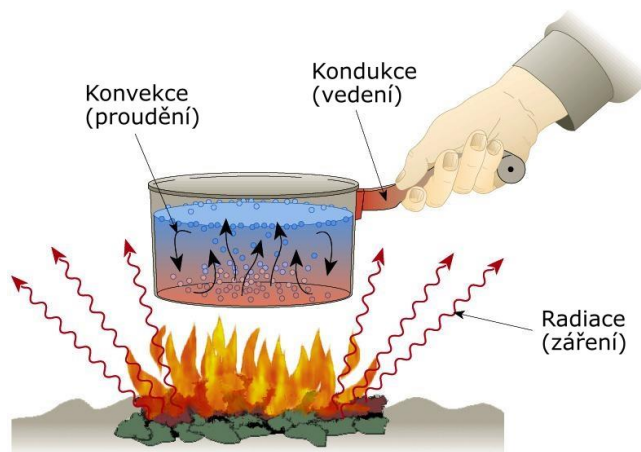
Pojmy *výměna tepla* a *přenos tepla* bývají rozlišovány. *Výměna tepla* je obecný děj tepelných operací, ke kterým dochází v uzavřené soustavě. Může k ní docházet například u trubkových výměníků tepla (TVT) v podobě ohřívání či chlazení. Princip výměny tepla je detailněji popsán na obr. 1. *Přenos tepla* je tok tepla v uzavřené soustavě s jednoznačně definovaným směrem tepelného toku, tedy z oblasti vyššího potenciálu do oblasti nižšího potenciálu. [3]



Obr. 1 Schéma vyjadřující výměnu tepla [3]

Přenos tepla se podle mechanismu transportu tepla dělí na tři typy: *kondukce* (vedení), *konvekce* (proudění) a *radiace* (záření). Schematicky jsou tyto tři přenosy tepla zobrazeny na obr. 2. Kondukce je přenos energie mezi sousedními částicemi hmoty při jejich přímém styku. V kovech dochází ke kondukcí difúzí volných elektronů, u kapalin a tuhých nekovových materiálů vlněním a u plynů difúzí atomů nebo molekul. Při radiaci dochází k přenosu energie z bodu o vyšší teplotě do místa s nižším energetickým potenciálem prostřednictvím emise a absorpce elektromagnetického záření v rozmezí přibližně 0,3 až 40 μm . K radiaci může docházet na vzdálenost nejen prostřednictvím média, ale (na rozdíl od kondukce a konvekce) také ve vakuu. [3] Radiace roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty. Proto se stává dominantní ve vysokoteplotních aplikacích, například v trubkových pecích. [1] Konvekce je přenos energie pomocí kondukce a radiace v pohyblivé tekutině. Pohyb tekutiny je nezbytným předpokladem konvektivního tepelného přenosu. [3]

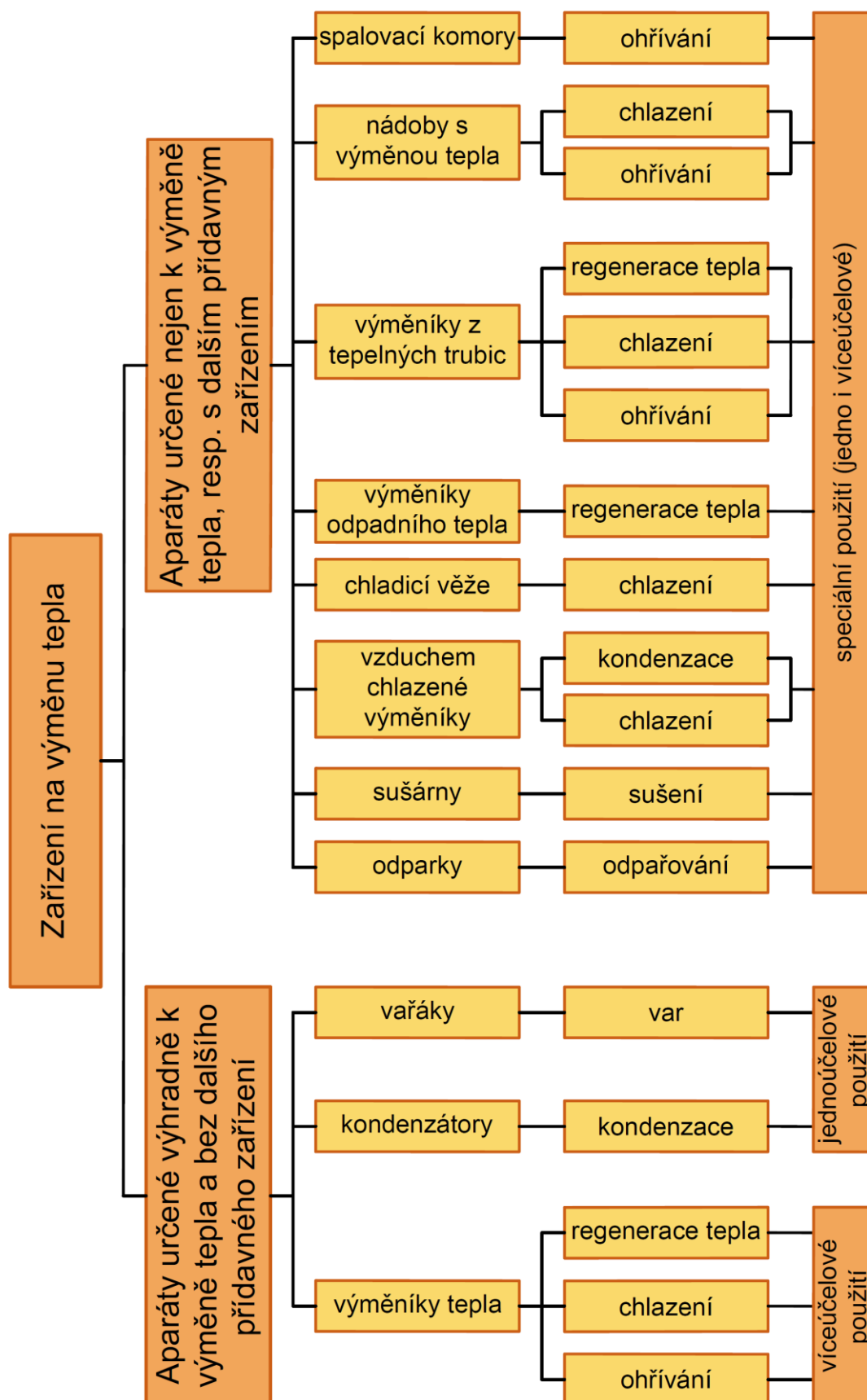
Zřídka se stává, že dochází pouze k jednomu z výše uvedených způsobů přenosu tepla. Většinou se vyskytuje více druhů současně. Při řešení technických problémů se většinou uvažuje alespoň převládající způsob přenosu tepla. [3]



Obr. 2 Tři typy přenosu tepla [4]

1.2 Zařízení na výměnu tepla

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tepelné výměníky jsou zařízení sloužící k přenosu tepla [3]. Uvnitř dochází k výměně tepelné energie mezi dvěma nebo více látkami o rozdílných teplotách [5]. Tepelné výměníky umožňují ohřívání, chlazení, regeneraci tepla, částečně i var a kondenzaci. Pracovní látky se mohou vyskytovat v jedné nebo dvou fázích (tj. kapalina a plyn zvlášť nebo kapalina a plyn dohromady) [3]. Často bývají media oddělena teplosměnným povrchem. Tepelné výměníky nacházejí uplatnění v chemickém průmyslu, při zpracování ropy a zemního plynu, v potravinářství, dopravě, klimatizační technice, chladicích systémech, kryogenice, při využití odpadního tepla a dalších průmyslových oblastech [5]. Pro představu jsou na obr. 3 shrnuty typy zařízení na výměnu tepla a jejich rozdělení [3].



Obr. 3 Základní rozdělení zařízení na výměnu tepla [3]

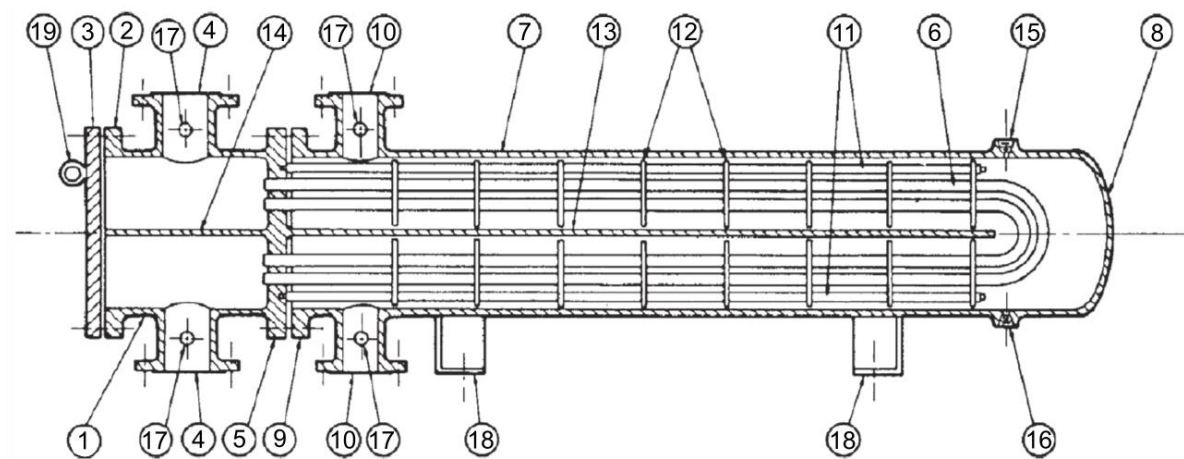
Kondenzátory s tepelnými výměníky úzce souvisí, proto se bude následující část práce stále vztahovat k tepelným výměníkům obecně a až následně bude pozornost zaměřena na kondenzátory.

Tepelné výměníky můžeme členit podle různých kritérií, např.:

- podle konstrukce
 - trubkové výměníky tepla (TVT)
 - s přímými trubkami
 - provedení trubka v trubce (Double pipe)
 - provedení se svazkem trubek v plášti (Shell-and-tube)
 - s U-trubkami
 - s vinutými trubkami
 - deskové výměníky tepla
 - s rovnými deskami
 - se spirálovými deskami
 - lamelové
 - z desek a výplní
 - speciální výměníky tepla
 - vytvořené z jednoho bloku
- podle počtu ploch zúčastňujících se přenosu tepla
 - bez plochy – směšovací výměníky
 - s jednou plochou – výměníky regenerátory
 - se dvěma plochami – výměníky rekuperátory
- podle počtu fází
 - jednofázové
 - dvoufázové
- podle smyslu proudění pracovních látek podél ploch přenosu tepla
 - souproudé
 - protiproudé
 - s křížovým prouděním
 - s kombinovaným prouděním. [3], [5]

Těleso trubkových výměníků tepla (dále TVT) se obvykle rozděluje na 2 části – trubkový prostor (TP) a mezitrubkový prostor (MP). Trubkový prostor tvoří vnitřní prostor trubek svazku, přední a zadní komora nebo jejich části. Mezitrubkový prostor představuje vnější prostor trubek svazku, ohraničený pláštěm výměníku a trubkovnicemi, případně částmi zadních komor. TVT mohou mít v TP jeden nebo více chodů, např. 2, 4, 6, 8. [3]

Tato diplomová práce je zaměřena na parní kondenzátor, jehož trubky jsou ve tvaru písmene U. Konstrukci se tedy blíží U-trubkovému výměníku tepla. Na obr. 4 a popiscích níže jsou popsány konstrukční prvky tohoto typu výměníku.



Obr. 4 Konstrukční řešení U-trubkového výměníku tepla [5]

Popis jednotlivých částí U-trubkového výměníku dle obr. 4:

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1 Meziplášť přední komory | 11 Vodicí a rozpěrné tyče |
| 2 Příruba přední komory | 12 Segmentové přepážky |
| 3 Víko přední komory | 13 Podélná přepážka |
| 4 Hrdlo přední komory | 14 Přepážka přední komory |
| 5 Pevná trubkovnice | 15 Ventilační otvor |
| 6 Trubky | 16 Vypouštěcí otvor |
| 7 Plášť | 17 Připojení měřicích zařízení |
| 8 Dno pláště | 18 Sedlová podpora |
| 9 Příruba pláště | 19 Zvedací oko [3], [5] |
| 10 Hrdlo pláště | |

Trubkové výměníky tepla jsou velmi často používaný typ výměníků. Existuje obchodní organizace TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.) sdružující mnoho světově významných výrobců TVT a vytvářející standardy. Na obr. 5 jsou zobrazeny jednotlivé části TVT a jejich možná konstrukční řešení dle standardu TEMA [6].

FRONT END STATIONARY HEAD TYPES	SHELL TYPES	REAR END HEAD TYPES
A CHANNEL AND REMOVABLE COVER	E ONE PASS SHELL	L FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
B BONNET (INTEGRAL COVER)	F TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
C CHANNEL INTEGRAL WITH TUBESHEET AND REMOVABLE COVER (removable tube bundle only)	G SPLIT FLOW	N FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
N CHANNEL INTEGRAL WITH TUBESHEET AND REMOVABLE COVER	H DOUBLE SPLIT FLOW	P OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
D SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	J DIVIDED FLOW	S FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
	K KETTLE TYPE REBOILER	T PULLTHROUGH FLOATING HEAD
	X CROSS FLOW	U U-TUBE BUNDLE
		W EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

Obr. 5 Části trubkových výměníků tepla dle standardu TEMA [7]

1.3 Kondenzace a zařízení s ní spojená

1.3.1 Kondenzace

Kondenzace je proces, při kterém nasycené páry plynů přicházejí do kontaktu s povrchem, jehož teplota je nižší než teplota sytých par dané látky nebo směsi. Tím, že je plynu odebíráno teplo dochází k přeměně plynu na kapalinu – kondenzaci. [1]

1.3.2 Kondenzátor

Kondenzátor je dvoufázový výměník tepla, ve kterém je teplo generováno přeměnou par na kapalinu (kondenzace), a vzniklé teplo je ze zařízení odebráno chladicím médiem [8]. V kondenzátorech obvykle kondenzuje vodní pára, chladicím médiem bývá často voda nebo vzduch [9].

Kondenzátory se využívají například v elektrárnách ke kondenzaci páry vystupující z turbíny nebo jako součást technologie při zpracování ropy. Můžeme je také nalézt v chladicích zařízeních, v nichž kondenzátory zkapalňují páry stlačeného chladiva vystupujícího z kompresoru. [10]

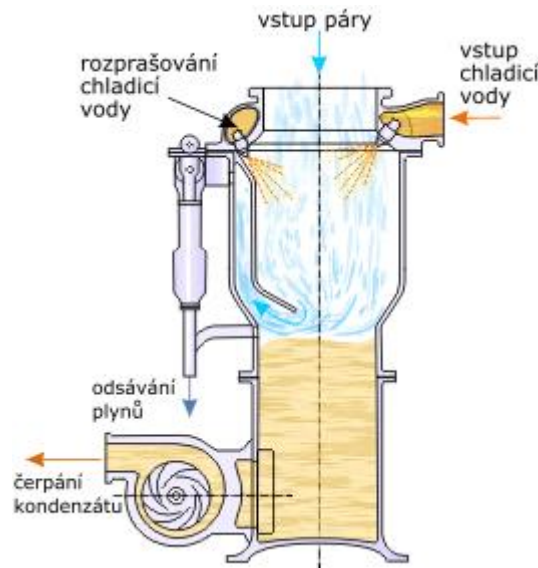
Výměníky tepla, označované jako povrchové kondenzátory, se používají ke kondenzaci páry za turbínou. Prakticky za každou rektifikační kolonu bývá zařazen kondenzátor. V něm může docházet buď k částečné nebo úplné kondenzaci par [10].

Z hlediska styku teplé a studené látky rozlišujeme 2 typy kondenzátorů: směšovací a povrchové [12].

1.3.3 Směšovací kondenzátory

U směšovacích kondenzátorů neexistuje plocha zúčastňující se přenosu tepla, dochází k přímému styku teplé a studené látky. Kondenzující páry mohou být například vhněny do nádrže s kapalinou (chladivem) nebo může být chladicí médium rozprašováno přímo do proudu kondenzujících par média. Další možností je kondenzace v náplňové komoře, kdy náplní (např. Raschigovými kroužky) shora stéká chladicí kapalina a zespodu je vhněn proud kondenzujících par. [8]

Princip rozprašování chladicího média do proudu par, zobrazen na obr. 6, je využíván například v destilačních nebo absorpčních kolonách. Výhodou přímého kontaktu médií je vysoká míra přenosu tepla a nízké tlakové ztráty. Naopak nevýhodou mohou být omezené podmínky, za kterých může kondenzující a chladicí médium přijít do vzájemného kontaktu. [8]



Obr. 6 Směšovací kondenzátor [11]

1.3.4 Povrchové kondenzátory

U povrchových kondenzátorů dochází k přenosu tepla skrze teplosměnnou plochu. V chemickém průmyslu se nejčastěji používají kondenzátory se svazkem trubek v plášti (TVT) nebo vzduchem chlazené kondenzátory. Ve druhém zmíněném případě proudí kondenzující páry uvnitř trubek, okolní vzduch slouží jako chladicí médium a je hnán ventilátory do prostoru mezi trubkami. Jiné typy kondenzátorů, např. trubka v trubce, deskové nebo směšovací kondenzátory jsou používány méně často. Povrchové kondenzátory konstruovány jako svazek trubek v plášti se mírně liší od trubkových výměníků tepla. Musí být uzpůsobeny ke kondenzaci par. Při kondenzaci par dochází k výraznému zmenšení objemu kondenzujícího média, například padesátinásobně nebo stonásobně. Díky tomu dochází v kondenzátorech mnohdy k výraznému poklesu tlaku a vzniku vakua. V kondenzátorech instalovaných v elektrárnách za turbínou bývá běžně absolutní tlak v rozmezí například 2 až 10 kPa. Při kondenzaci vzniká kapalina – kondenzát, zároveň dochází k odčerpávání nezkondenzovaných plynů. Vakuum bývá obvykle v mezitrubkovém prostoru. V další části bude zaměřena pozornost na kondenzátory se svazkem trubek v plášti. [3], [10], [12]

U kondenzačních turbín lze dosáhnout zlepšení vakua v kondenzátoru těmito způsoby:

- snížením teploty chladicí vody
- zvětšením průtoku chladicí vody
- zvětšením teplosměnné plochy. [12]

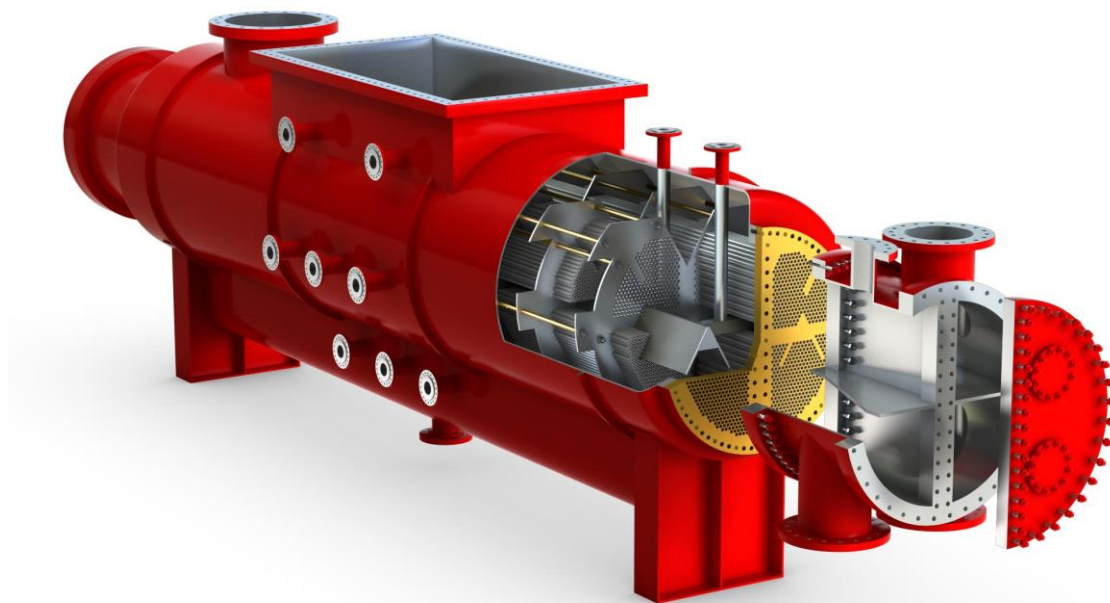
V elektrárnách existují dva typy chlazení kondenzujících par: průtočné a oběhové. Rychlost chladicí vody je součástí technicko-ekonomického rozboru. Při zvýšení rychlosti vody dochází ke zvětšení součinitele prostupu tepla a zmenšení teplosměnné plochy, tedy i snížení počtu trubek, rozměrů kondenzátoru a úspoře nákladů. Naopak se zvyšují hydraulické ztráty, což vede ke zvýšení spotřeby energie, kterou je nutno dodat čerpadlům. Z pohledu usazování nečistot v trubkách by rychlost neměla být menší než 1 m/s. Pokud je voda nečistá, je vyžadována minimální rychlost vody až 2 m/s. Na druhou stranu by rychlost vody kvůli vibracím neměla přesáhnout 2,5 m/s. V závislosti na typu chladicí vody je doporučována rychlost proudění v trubkách 1,8 až 2,2 m/s. [12]

Tvar a rozměry kondenzátoru by měly vyhovovat dispozičnímu uspořádání v místě montáže kondenzátoru. Zařízení by mělo být také co možná nejvhodněji uzpůsobené transportu z místa výroby na místo použití. [12]

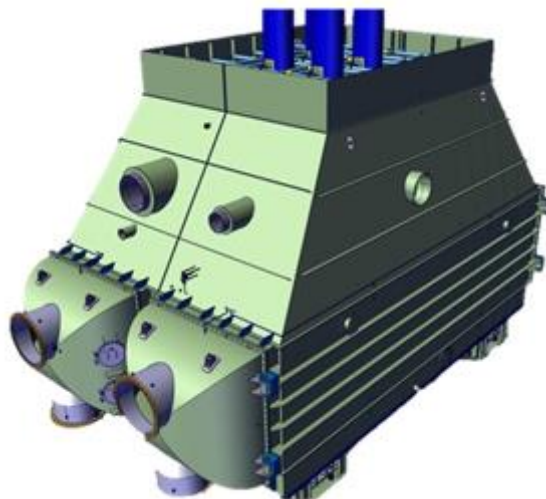
Kondenzátory se svazkem trubek v plášti se podle výkonu zařízení, ke kterému bývají umístěny, obvykle vyrábějí ve dvou provedeních:

- 1) kondenzátory válcového tvaru, s kruhovým příčným průřezem – pro turbíny menších výkonů, viz obr. 7,
- 2) kondenzátory hranolovitého tvaru – pro turbíny větších výkonů, viz obr. 8. [12]

Hranolovitý tvar není z pevnostního hlediska výhodný, bývá nutné vyztužení vnějšími žebry. Na druhou stranu umožňuje lepší využití prostoru vedle nebo pod turbínou. [12]



Obr. 7 Kondenzátor válcového tvaru [13]



Obr. 8 Kondenzátor hranolovitého tvaru [14]

Další ukázky možných konstrukčních variant kondenzátorů jsou uvedeny v následujících částech práce.

Při proudění par kondenzátorem nemusí vždy dojít k úplné kondenzaci směsi. Proto se mnohdy stává, že plyny odsávané z kondenzátorů tvoří tzv. parovzdušnou směs. V případě, že je potřeba získat čisté plyny, bývá za kondenzátor zařazen chladič, který zajišťuje kondenzaci zbývajících par. Na čerpání parovzdušné směsi je vhodná vodokružná vývěva. Ta je použitelná pro čerpání téměř všech plynů a par i s vyšším obsahem kapalných příměsí. [12]

Díky tomu, že odsávaný kondenzát se vyskytuje ve vakuu, hrozí zejména na čerpadle kondenzátu za daných podmínek vznik kavitace. Tomu se dá předejít dvěma možnými způsoby:

- 1) zvýšením nátokové výšky kondenzátu
- 2) snížením teploty kondenzátu. [12]

Vhodná nátoková výška se pohybuje například v rozsahu 1,2 až 2,5 m. Tím se pokryjí tlakové ztráty ve spojovacím potrubí a dynamický pokles tlaku na vstupu do čerpadla. Existují dva způsoby, jak snížit teplotu kondenzátu:

- a) uvnitř kondenzátoru
- b) vně kondenzátoru. [12]

V případě, že má být kondenzát chlazen uvnitř kondenzátoru, je potřeba odvést část chladicích trubek od trubkového svazku. To vede k úpravě konstrukce, která může vést ke zvýšení nákladů. Pokud je kondenzát chlazen mimo těleso kondenzátoru, je k němu zapojen chladič. Tím, že nedochází ke konstrukčním úpravám kondenzátoru, se může tato volba i přes náklady na chladič jevit jako cenově výhodnější. [12]

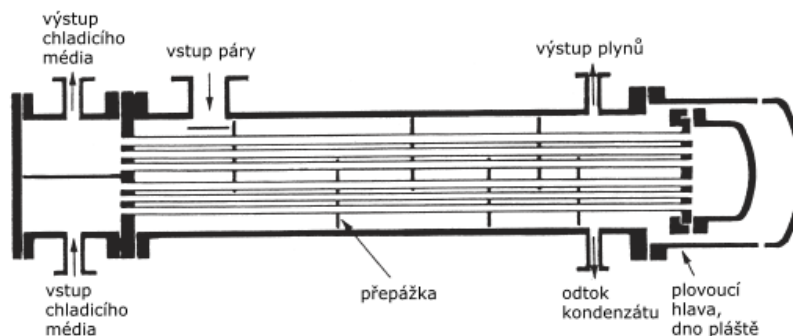
Konstrukční uspořádání kondenzátorů se svazkem trubek v plášti bude níže rozlišeno ze dvou hledisek:

- podle orientace svazku trubek

- horizontální
- vertikální
- podle místa kondenzace
 - v mezitrubkovém prostoru (MP)
 - v trubkovém prostoru (TP). [8], [10]

Horizontální kondenzátor s párou kondenzující v mezitrubkovém prostoru

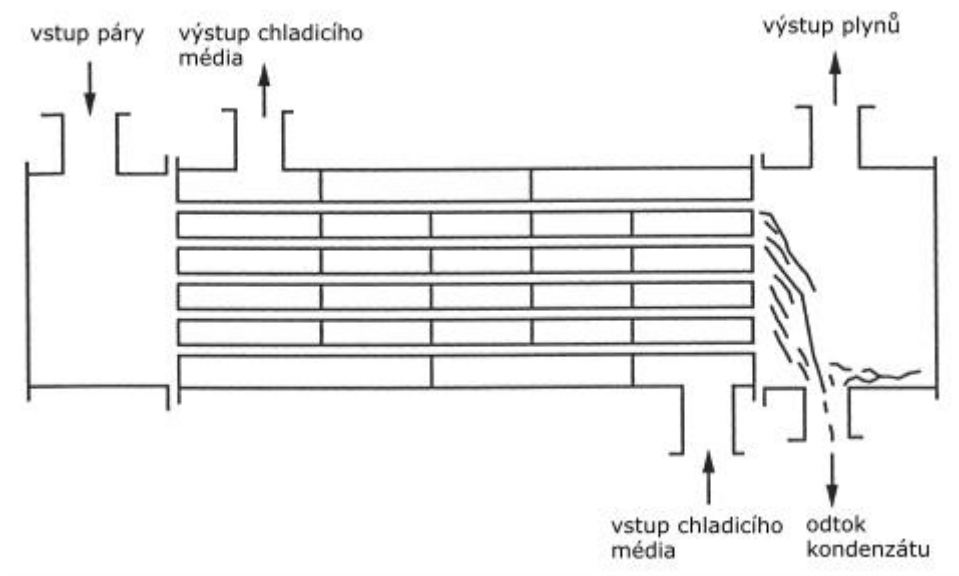
Kondenzátory se svazkem trubek v plášti mohou být konstruovány jako výměníky tepla dle normy TEMA, viz obr. 5. Kondenzátory s kondenzací v mezitrubkovém prostoru mohou mít dle TEMA konstrukční uspořádání pláště typu E, G, H, J a X [7]. Nejjednodušší je použít plášť typu E, tedy jeden chod par v mezitrubkovém prostoru. Typ F se pro kondenzaci par vně trubek obvykle nepoužívá. V porovnání s ostatními typy tepelných výměníků mají kondenzátory důležitý konstrukční prvek – otvor pro odvod nekondenzujících plynů. Proto má například kondenzátor s E-typem pláště dvě výstupní hrdla: jedno pro odvod nekondenzujících plynů a druhé pro odtok kondenzátu. Nekondenzující plyny způsobují snížení teploty kondenzace parní směsi, tedy i snížení teplotního rozdílu mezi teplým a studeným proudem. Hrdlo pro odvod nekondenzujících plynů zajišťuje, aby nedocházelo k akumulaci těchto plynů v zařízení během provozu. Schematické zobrazení horizontálního kondenzátoru s kondenzací v mezitrubkovém prostoru je na obr. 9. [8], [10]



Obr. 9 Horizontální kondenzátor s kondenzací v mezitrubkovém prostoru [10]

Horizontální kondenzátor s párou kondenzující v trubkovém prostoru

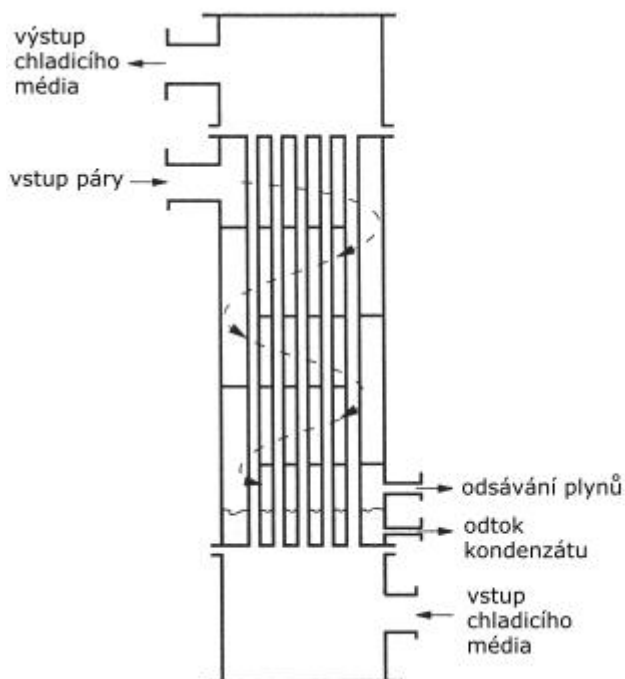
Tento typ je nejčastěji používán ve vzduchem chlazených kondenzátorech, v kotlových a termosifónových vařácích. Uspořádání trubek může být jednochodé, vícechodé nebo mohou být použity U-trubky. Obvykle se nevyskytují více než dva chody trubek. V případě použití U-trubkového svazku s odlišnou délkou vstupního a výstupního chodu dochází k odlišné kondenzaci, než u trubkového svazku s přímými trubkami s jedním chodem se stejnou teplosměnnou plochou. Na obr. 10 je možné vidět schematické uspořádání horizontálního kondenzátoru, kdy pára kondenzuje v trubkách s jedním chodem. Ze spodní části zadní komory odtéká kondenzát, nekondenzující plyny jsou odváděny horní částí. V opačném směru proudí chladicí medium v jednom chodu v plášti. [8]



Obr. 10 Horizontální kondenzátor s kondenzací v trubkovém prostoru [10]

Vertikální kondenzátor s párou kondenzující v mezitrubkovém prostoru

Vertikální kondenzátor s pláštěm typu E je zobrazen na obr. 11. Odsávání plynů se nachází v blízkosti odtoku kondenzátu na „chladném konci“ kondenzátoru. Výhodou tohoto typu kondenzátoru je možnost kondenzace široké škály směsí. Naopak nevýhodou tohoto uspořádání je obtížné čištění trubek. Proto by daný typ kondenzátoru neměl být použit společně s chladicím médiem náchylným k zanášení. [8]

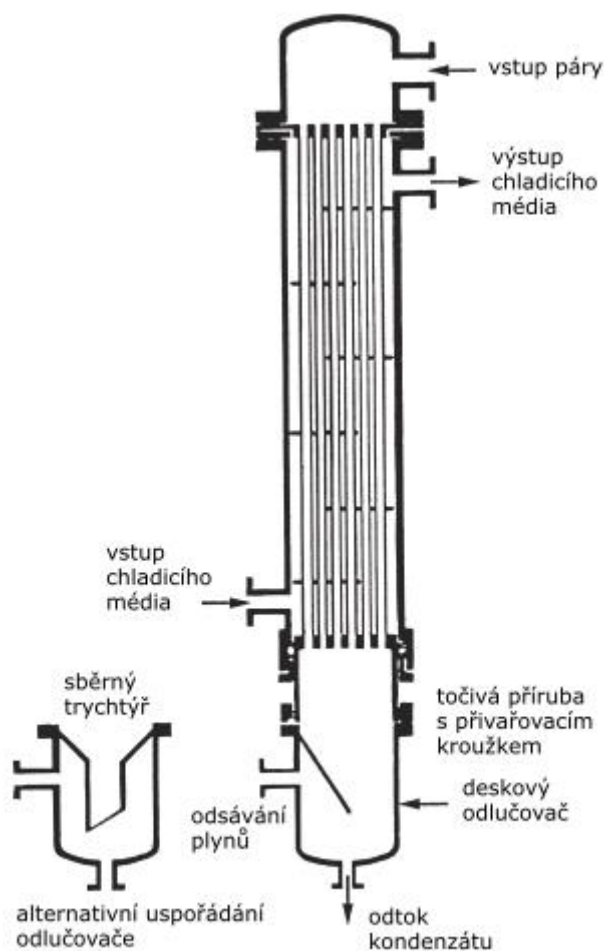


Obr. 11 Vertikální kondenzátor s kondenzací v mezitrubkovém prostoru [9]

Vertikální kondenzátor s párou kondenzující v trubkovém prostoru

U tohoto typu kondenzátorů často proudí společně pára a kondenzát shora dolů, viz obr. 12. V horní části vstupuje pára do zařízení a proudí trubkami směrem dolů spolu se skapávajícím kondenzátem. Pokud je možné chemicky čistit mezitrubkový prostor, může být použita konstrukce s pevnou trubkovnicí. Další možné řešení představují dva chody trubek, např. U-trubek. V takovém případě je podmínkou pro správnou funkci kondenzátoru uspořádání, kdy je první tah páry orientován zespodu směrem nahoru a druhý tah opačně. Vertikální kondenzátory musí mít také adekvátně zajištěno odsávání plynů. To je u aparátů s tokem shora dolů umístěno ve velké spodní komoře, nad nejvyšší uvažovanou hladinou vzniklého kondenzátu. [8]

Vertikální kondenzátory s párou kondenzující v trubkovém prostoru mohou být také navrženy jako refluxní kondenzátory (se zpětným tokem). Pára v nich proudí ze spodní části směrem nahoru, přičemž kondenzát vznikající na stěnách trubek stéká gravitačně dolů, proti směru páry. Nekondenzující plyny proudí trubkami a jsou odsávány v horní části kondenzátoru. Omezení, na které je třeba při provozu dbát, představuje riziko zahlcení trubek vzniklým kondenzátem. Refluxní kondenzátory bývají obvykle relativně „krátké“ aparáty, měřící na délku přibližně dva až pět metrů, s velkým průměrem. Při provozu musí být také zaručeno, aby rychlost páry vstupující do trubek ve spodní části byla dostatečně nízká a kondenzát mohl volně skapávat z trubek. [8]



Obr. 12 Vertikální kondenzátor s kondenzací v trubkovém prostoru [10]

2 Parní kondenzátor

Tato diplomová práce se zabývá kontrolním pevnostním výpočtem parního kondenzátoru. Pro výpočty byl vybrán povrchový kondenzátor s horizontálním uspořádáním trubek. V mezitrubkovém prostoru kondenzuje pára, v chladicích trubkách proudí voda. Na obr. 13 je zobrazeno těleso zadaného kondenzátoru.



Obr. 13 Skořepinový model kondenzátoru

2.1 Zadané parametry

V tab. 1 jsou uvedeny základní parametry kondenzátoru pro výpočet.

Tab. 1 Základní zadané parametry kondenzátoru

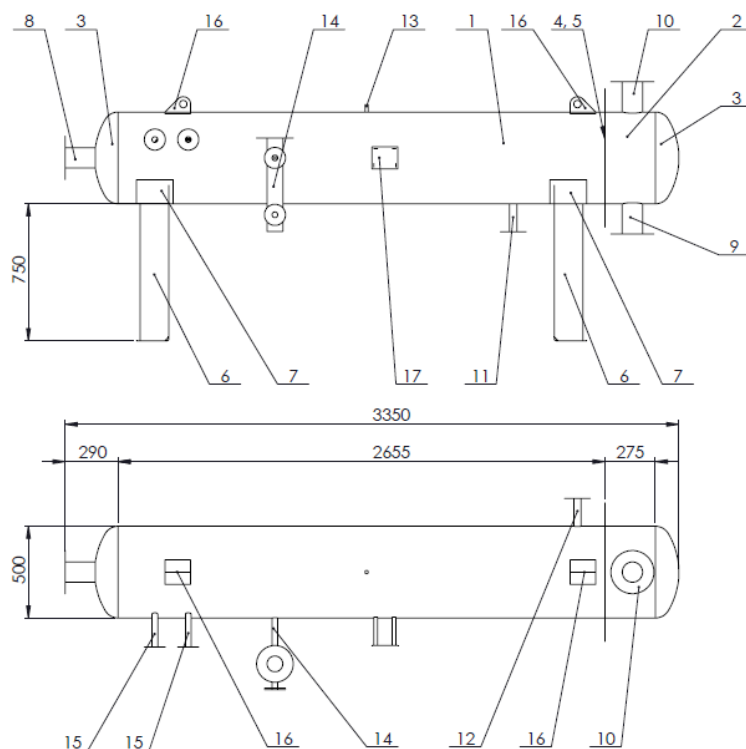
Popis	Hodnota		Jednotka
Část kondenzátoru	Trubky	Mezitrubkový prostor	-
Pracovní látka	VODA	PÁRA	-
Nejvyšší dovolený tlak	600	1600	kPa
Nejnižší dovolený tlak	-	5	kPa
Nejvyšší dovolená teplota	110	202	°C
Maximální tepelný výkon	800		kW
Nejvyšší kondenzační výkon	800		kg _{páry} /h
Vstupní teplota vody	25		°C

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2, kondenzátor, na který je zaměřena tato práce využívá trubky ve tvaru písmene U. Trubky uvnitř pláště nejsou rozmístěny po celé délce ani průřezu pláště, viz obr. 17. Důvodem je zapojení kondenzátoru za pístový parní stroj. Přestože se předpokládá nízký průtok páry, vznikají při proudění páry z parního stroje tlakové pulzace. Proto je mezi trubkovým svazkem a pláštěm značný prostor, který umožní páře rozptýlení kolem trubkového svazku tak, aby v trubkách nevznikaly vibrace.

V tab. 2 jsou uvedeny nejdůležitější geometrické charakteristiky kondenzátoru. U tohoto zařízení byly zadány i některé další části, např. počet, umístění a velikost hrdel. Ty jsou schematicky zobrazeny na obr. 14. Tab. 3 udává materiál použitý pro jednotlivé prvky kondenzátoru.

Tab. 2 Geometrické charakteristiky kondenzátoru

Popis	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr pláště	508	mm
Tloušťka stěny pláště	8	mm
Počet chodů trubek	2	-
Počet trubek v 1 chodu	65	-
Délka přímé části trubek	2 300	mm
Vnější průměr trubek	14	mm
Tloušťka stěny trubek	1	mm



	SOUČÁST	KS	ROZMĚR
1	Plášť	1	DN 500
2	Komora	1	DN 500
3	Torosférické dno	2	PN 40
4	Trubkovnice	1	DN 500, PN 40
5	Příruba komory	1	DN 500, PN 40
6	Sedlová podpora	2	-
7	Podložný plech	2	-
8	Hrdlo N1	1	DN 100, PN 40
9	Hrdlo N2	1	DN 100, PN 40
10	Hrdlo N3	1	DN 100, PN 40
12	Hrdlo N5	1	DN 32, PN 40
11	Hrdlo N4	1	DN 32, PN 40
13	Odvzdušnění N6	1	G 1/4"
14	Sestava měření hladiny N7	1	DN 25, PN 40
15	Hrdlo N8	2	DN 25, PN 40
16	Závěsné oko	2	-
17	Štítek	1	-

Obr. 14 Sestava kondenzátoru a popis jeho hlavních částí

Popis funkce hrdel:

- Hrdlo N1 – vstup parovodní směsi do kondenzátoru,
- Hrdlo N2 – vstup chladicí vody,
- Hrdlo N3 – výstup chladicí vody,
- Hrdlo N4 – výstup kondenzátu,
- Hrdlo N5 – výstup inertních plynů,
- Odvzdušnění N6 – odvzdušňovací ventil, využívá se pro odvzdušnění kondenzátoru při plnění vodou pro tlakovou zkoušku,
- Sestava měření hladiny N7 – část zařízení, ve které je měřena hladina kondenzátu pomocí ultrazvuku,
- Hrdlo N8 – vstup vody z předchozí technologie.

Tab. 3 Materiál jednotlivých konstrukčních částí

Součást	Materiál
Plášť	P265GH
Komora	P265GH
Torosférické dno	P265GH
Trubkovnice	P265GH
Trubky	X5CrNi18-10
Hrdla	P235GH, P245GH
Přepážka komory	P265GH
Přepážky	S235JR
Sedlové podpory	P235GH
Měření hladiny	P235GH, P245GH

3 Tepelně-hydraulický návrh v softwaru HTRI

3.1 Základní informace

Součástí pevnostní analýzy je v tomto případě také provedení tepelně-hydraulického výpočtu. Cílem je získat teploty na vnějším povrchu trubek. Díky tomu je možno během pevnostní analýzy v softwaru ANSYS sledovat strukturní odezvu trubek a trubkovnice na teplotní zatížení. Pro tento účel byl proveden tepelně-hydraulický výpočet v softwaru HTRI v modulu *Xist*.

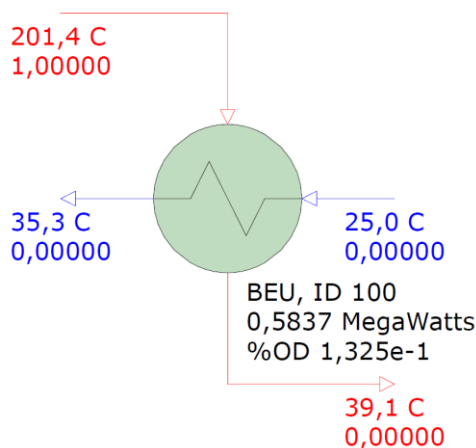
HTRI (Heat Transfer Research, Inc.) je světově významná organizace zabývající se technologií, výzkumem a vývojem softwaru v oblasti přenosu tepla. Tato společnost je zaměřena například na tepelné výměníky, vařáky, výparníky, vzduchové chladiče a ekonomizéry, používané v chemickém a petrochemickém průmyslu [15].

V softwaru HTRI existují 3 typy výpočtu – *desing*, *rating* a *simulation*. V tomto případě byl použit přístup *simulation*. Byla zadána geometrie kondenzátoru, vstupní teploty horkého a chladného média a následně byl vypočten tepelný výkon a výstupní teploty obou médií. Software HTRI je schopen poskytovat výsledky různých fyzikálních veličin (např. teplota proudícího média, teplota na některých plochách zařízení, tlak, rychlost, plocha, tepelný výkon, součinitel prostupu tepla, entalpie, Reynoldsovo číslo a další) v jednotlivých částech zařízení tím, že program si zařízení rozdělí na úseky. V tomto případě si software automaticky rozdělil každý chod trubek (délka přímé části 2300 mm) na 21 úseků. Celkem byly tedy získány teploty pro 42 úseků trubek. V místě ohybu trubek byla uvažována teplota stejná jako ve 21. úseku.

3.2 Výsledky tepelně-hydraulického výpočtu

Výsledky výpočtu je možno vidět níže. Na obr. 15 je zobrazeno procesní schéma kondenzátoru. Červený proud značí páru, resp. kondenzát, modrý proud představuje chladicí vodu. Pára nejprve zkondenzuje, následně dochází k jejímu ochlazení až na 39 °C. Je to výrazný teplotní rozdíl, který je způsoben nízkým průtokem páry 0,22 kg/s a průtokem vody 13,5 kg/s. V kondenzátorech používaných v elektrárnách k takovému ochlazení příliš nedochází. Důvodem je výrazně vyšší průtok páry z turbíny, který může dosahovat například padesátinásobně vyšších hodnot. Chladicí voda je v kondenzátoru ohřáta přibližně o 10 °C, což odpovídá běžné praxi [12].

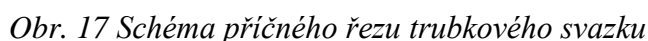
Shrnutí výsledků výpočtu je uvedeno na obr 16, výstupní zpráva je dostupná v příloze č. 1.



Obr. 15 Procesní schéma kondenzátoru

<div>HTRI</div>		<div>Final Results</div>		<div>Page 5</div>	
		<div>Released to the following organization: VUT v Brne Tester</div>			
<div>Xist Ver. 7 SP1 07.03.2017 11:40 SN: 01016-1007468327</div>				<div>SI Units</div>	
<div>Simulation - Horizontal Multipass Flow TEMA BEU Shell With No Baffles</div>					
<div>Process Data</div>		<div>Hot Shellside</div>		<div>Cold Tubeside</div>	
<div>Fluid name</div>		<div>PÁRA</div>		<div>VODA</div>	
<div>Fluid condition</div>		<div>Cond. Vapor</div>		<div>Sens. Liquid</div>	
<div>Total flow rate</div>		<div>(kg/s)</div>		<div>0,2220</div>	
<div>Weight fraction vapor, In/Out</div>		<div>(--)</div>		<div>0,0000</div>	
<div>Temperature, In/Out</div>		<div>(Deg C)</div>		<div>0,0000</div>	
<div>Temperature, Average/Skin</div>		<div>(Deg C)</div>		<div>25,00</div>	
<div>Wall temperature, Min/Max</div>		<div>(Deg C)</div>		<div>30,17</div>	
<div>Pressure, In/Average</div>		<div>(kPa)</div>		<div>50,31</div>	
<div>Pressure drop, Total/Allowed</div>		<div>(kPa)</div>		<div>84,48</div>	
<div>Velocity, Mid/Max allow</div>		<div>(m/s)</div>		<div>27,05</div>	
<div>Mole fraction inert</div>		<div>(--)</div>		<div>84,48</div>	
<div>Average film coef.</div>		<div>(W/m2-K)</div>		<div>600,00</div>	
<div>Heat transfer safety factor</div>		<div>(--)</div>		<div>586,77</div>	
<div>Fouling resistance</div>		<div>(m2-K/W)</div>		<div>26,451</div>	
				<div>1,84</div>	
				<div>0,0000</div>	
				<div>3105,6</div>	
				<div>1,0000</div>	
				<div>0,000176</div>	
				<div>8986,3</div>	
				<div>1,0000</div>	
				<div>0,000000</div>	
<div>Overall Performance Data</div>					
<div>Overall coef., Reqcd/Clean/Actual (W/m2-K) 1451,0 / 1952,5 / 1452,9</div>					
<div>Heat duty, Calculated/Specified (MegaWatts) 0,5837 /</div>					
<div>Effective overall temperature difference (Deg C) 29,6</div>					
<div>EMTD = (MTD) * (DELTA) * (F/G/H) (Deg C) 109,07 * 0,2714 * 1,0000</div>					
<div>See Runtime Messages Report for warnings.</div>		<div></div>			
<div>Exchanger Fluid Volumes</div>		<div></div>			
<div>Approximate shellside (L)</div>		<div>407,8</div>			
<div>Approximate tubeside (L)</div>		<div>151,2</div>			
<div>Shell Construction Information</div>					
<div>TEMA shell type BEU Shell ID (mm) 492,00</div>					
<div>Shells Series 1 Parallel 1 Total area (m2) 13,856</div>					
<div>Passes Shell 1 Tube 2 Eff. area (m2/shell) 13,592</div>					
<div>Shell orientation angle (deg) 0,00</div>					
<div>Impingement present No</div>					
<div>Pairs seal strips 1 Passlane seal rods (mm) 0,000 No. 0</div>					
<div>Shell expansion joint No Full support at U-Bend No</div>					
<div>Weight estimation Wet/Dry/Bundle 1467,5 / 908,64 / 263,07 (kg/shell)</div>					
<div>Baffle Information</div>					
<div>Type None Baffle cut (% dia)</div>					
<div>Crosspasses/shellpass 1 No. (Pct Area) (mm) to C.L.</div>					
<div>Central spacing (mm) 2377,2 1</div>					
<div>Inlet spacing (mm) 0,00 2</div>					
<div>Outlet spacing (mm) 0,00</div>					
<div>Baffle thickness (mm) 0,00</div>					
<div>Use deresonating baffles No</div>					
<div>Tube Information</div>					
<div>Tube type Plain Tubecount per shell 130</div>					
<div>Length to tangent (m) 2,30 Pct tubes removed (both)</div>					
<div>Effective length (m) 2,377 Outside diameter (mm) 14,000</div>					
<div>Total tubesheet (mm) 46,04 Wall thickness (mm) 1,000</div>					
<div>Area ratio (out/in) 1,1667 Pitch (mm) 27,000 Ratio 1,9286</div>					
<div>Tube metal 321 Stainless steel (18 Cr,10 Ni) Tube pattern (deg) 60</div>					

Obr. 16 Souhrn výsledků tepelně-hydraulického výpočtu



Z obr. 17 je patrný relativně velký prostor mezi pláštěm a trubkovým svazkem (přibližně 130 mm z každé strany) a také poměrně velká rozteč mezi trubkami (při vnějším průměru trubek 14 mm je rozteč 27 mm). Jedná se o atypické řešení. Důvodem je, jak již bylo zmíněno v části 2.1, vytvoření prostoru pro rozptýlení pulzující páry proudící z parního stroje a také možnost „dostat se“ při nízkém průtoku 0,22 kg/s do prostoru mezi trubky.

Vzhledem k tomu, že vnější povrch trubek je v kontaktu s kondenzující parou, předpokládá se na něm vyšší teplota než na vnitřním povrchu. Tento rozdíl by mohl mít teoreticky také vliv na zatížení trubek a trubkovnice v pevnostní analýze. Proto bylo cílem tepelně-hydraulického výpočtu získat průběh teplot na vnějším povrchu trubek po jejich délce. Modul *Xist* bohužel tato data neposkytuje. Výstupem tepelně-hydraulického výpočtu jsou teploty na vnitřním povrchu trubek. Ty jsou uvedeny v příloze č. 1 na stranách 12-18, řádek „*Skin temperature*“. Tyto teploty jsou vztahovány pro všechny řady trubek jednoho chodu trubkového svazku. Každý chod trubek má 7 řad s tím, že první chod je ve spodní části U-trubkového svazku a druhý chod v části horní. Jak již bylo zmíněno výše, cílem bylo získat teploty na vnějším povrchu trubek pro jednotlivé řady každého chodu. Proto bylo potřeba teploty přepočítat. Po několika pokusech, jejichž výsledky se jeví jako nerelevantní, byl zvolen následující postup:

1. Přepoččet teploty vnitřního povrchu na vnější povrch trubek, pro jednotlivé úseky, na které jsou trubky po délce rozděleny. Jedná se o střední teploty vzta-hující se na všechny trubky daného chodu.
2. Výpočet rozložení teplot pro jednotlivé řady trubek daného chodu. Byly uva-žovány nejnejpříznivější možné stavy, které mohou pro dané zařízení za před-pokládaných provozních podmínek nastat.

3.3 Výpočet teploty na vnějším povrchu trubek

Krok č. 1 se týkal kondukce, byl využit Fourierův zákon, popsán v rovnici (1). Bylo možno použít vztah pro rovinnou stěnu, protože tloušťka stěny 1 mm je zanedbatelná vzhledem k vnějšmu průměru trubek 14 mm [1], [3].

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{W2} - T_{W1}) \quad (1)$$

kde:

\dot{q} – tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

λ – součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] = [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]

δ – tloušťka stěny trubky [m],

T_{W2} – teplota stěny na vnějším povrchu trubky [$^\circ\text{C}$],

T_{W1} – teplota stěny na vnitřním povrchu trubky [$^\circ\text{C}$],

Ve vztahu (1) se vyskytují termodynamické teploty. Vzhledem k tomu, že vztah popisuje rozdíl termodynamických teplot v Kelvinech, který je shodný jako rozdíl teplot ve stupních Celsia, byly do vztahu dosazovány teploty přímo ve stupních Celsia. Po úpravě vztahu (1) byl získán vztah (2), který je potřebný pro výpočet teplot na vnějším povrchu trubek.

$$T_{W2} = T_{W1} + \frac{\dot{q} \cdot \delta}{\lambda} \quad (2)$$

Z tepelně-hydraulického výpočtu v HTRI, viz příloha č. 1, strany 12-18, byly známy tyto hodnoty, proměnné pro jednotlivé úseky trubek:

- teplota T_{W1} pod označením „*Skin temperature*“
- tepelný tok \dot{q} pod označením „*Heat flux*“.

Při výpočtu byly uvažovány následující konstanty:

- $\delta = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$
- pro korozivzdornou ocel 1.4301 $\lambda = 14,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Výsledky výpočtu T_{W2} v krocích 1 i 2 jsou uvedeny v příloze č. 2.

3.4 Výpočet rozložení teplot pro jednotlivé řady trubek daného chodu

Krok č. 2, jak je již zmíněno výše, spočíval ve výpočtu rozložení teplot pro jednotlivé řady trubek daného chodu. Výchozími hodnotami byly střední teploty T_{W2} , tedy teploty na vnějším povrchu trubek, ovšem vztaženy pro všechny řady trubek daného chodu. Bylo tedy potřeba teploty rozpočítat pro řady 1–7. Teploty T_{W2} byly uvažovány pro prostřední, 4. řadu trubek. Následně byly uvažovány nejnejpříznivější možné stavy, které mohou pro dané zařízení za předpokládaných provozních podmínek nastat.

- **Nejvyšší uvažovaná teplota – 202 $^\circ\text{C}$**

V tomto případě byla za nejvyšší možnou dosažitelnou teplotu uvažována teplota syté páry při tlaku 1600 kPa, zaokrouhlena na 202 $^\circ\text{C}$. Tato teplota se předpokládala pouze

v 1. řadě trubek – vně trubkového svazku a zároveň v místě vstupu páry do mezitrubkového prostoru kondenzátoru, u tohoto zařízení tedy v místě ohybu trubek, tj. na konci prvního a na začátku druhého chodu trubek.

- **Nejnižší uvažovaná teplota – 25 °C**

Za nejnižší možnou teplotu na vnějším povrchu trubek byla považována vstupní teplota chladicí vody 25 °C v místech, kam se pára dostane „nejobtížněji“ a v místě, které se nachází nejdál od místa vstupu páry do kondenzátoru. Zde tedy uprostřed trubkového svazku, v 7. řadě, na začátku prvního chodu. Na konci druhého chodu tato teplota nebyla uvažována, protože se předpokládalo, že teplota na vnějším povrchu trubky vzroste minimálně vlivem ohřevu chladicí vody.

Schéma zobrazující výsledek výpočtu teplot na vnějším povrchu trubek je na obr. 18. Při výpočtu byla pro každý úsek použita lineární extrapolace dle rovnice (4).

$$\frac{T_{max}}{T_{mean}} = \frac{T_{mean}}{T_{min}} = x \quad (3)$$

kde:

T_{max} – nejvyšší teplota v daném místě [°C],

T_{mean} – střední teplota v daném místě [°C],

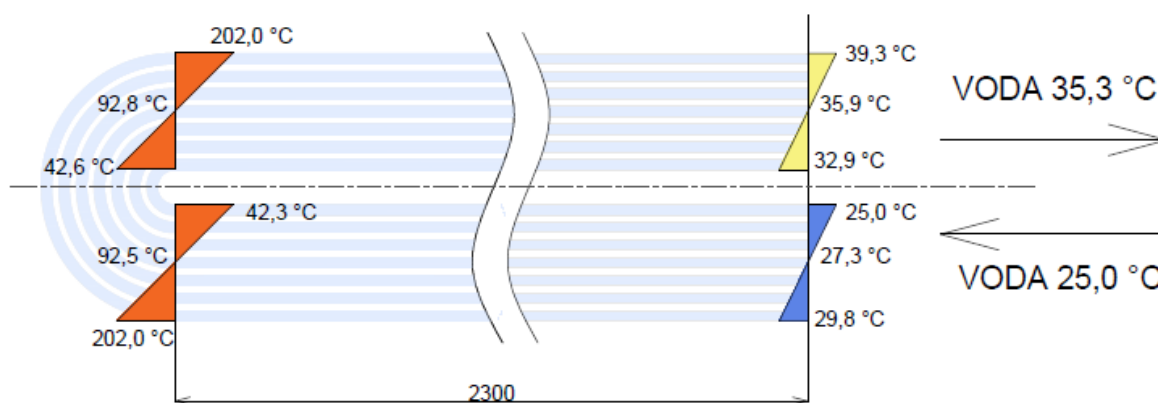
T_{min} – nejnižší teplota v daném místě [°C],

x – poměr teplot [-].

Tedy například na konci prvního chodu byla v kroku č. 1 vypočtena střední teplota $T_{w2} = T_{mean} = 92,5$ °C. Zde byla uvažována $T_{max} = 202,0$ °C. Nejnižší teplota byla vypočtena jako

$$T_{min} = \frac{T_{mean}}{x} = \frac{92,5}{2,18} = 42,3$$
 °C. (4)

Po vypočtení okrajových teplot byly lineární interpolací dopočítány teploty pro všech 7 řad trubek pro oba chody ve všech úsecích.



Obr. 18 Schéma výsledku výpočtu okrajových teplot na vnějším povrchu trubek

4 Základní informace týkající se návrhu zařízení

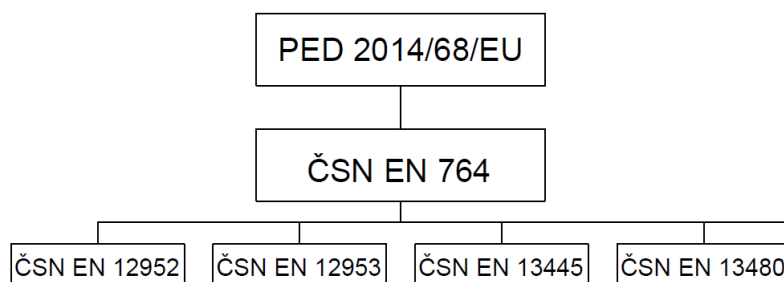
Důležitý aspekt při návrhu zařízení představují předpisy. Jejich stručný popis je uveden v podkapitole 4.1. S návrhem úzce souvisí metody výpočtu. Proto je níže popsána velmi často používaná metoda konečných prvků. Tuto metodu využívá například software ANSYS Workbench, o kterém je pojednáno v poslední části čtvrté kapitoly.

4.1 Předpisy při návrhu zařízení

Níže jsou popsány právní předpisy stanovující pravidla dodávání tlakových zařízení na trh s významem pro Evropský hospodářský prostor. Největší pozornost je zaměřena na normu ČSN EN 13445, podle které je proveden pevnostní návrh parního kondenzátoru. [16]

4.1.1 Obecně

Existuje řada předpisů a norem zajišťujících bezpečnost a spolehlivost procesních zařízení. Při návrhu zařízení se mezi celosvětově nejpoužívanější předpisy řadí *PED 2014/68/EU* a části *ASME CODE*. Pro Českou Republiku byl přechod od státních k harmonizovaným normám proveden v roce 2002, zastřešovala je směrnice evropské komise *PED* (Pressure Equipment Directive) 97/23/EC. V roce 2016 byla aktualizována na Směrnici Evropského parlamentu a rady *PED 2014/68/EU*. Tato směrnice se vztahuje na tlaková zařízení a sestavy nově uvedené na trh Evropské unie, která jsou vystavena nejvyššímu dovolenému tlaku PS většímu než 0,5 bar. Zároveň je tato směrnice nadřazená normativním předpisům. Na obr. 19 je zobrazen vztah mezi *PED 2014/68/EU* a předpisy této směrnici podřízené [16], [17].



Obr. 19 Vztahy mezi *PED 2014/68/EU* a normativními předpisy [16]

Výše uvedené normy se týkají následujících oblastí:

ČSN EN 764 – Tlaková zařízení. Tato norma slouží jako podpora pro splnění podstatných požadavků směrnice *PED 2014/68/EU*. Součástí je definování základní terminologie, značek používaných pro tlaková zařízení a souborů, na které se *PED* vztahuje.

ČSN EN 12952 – Vodotrubné kotle a pomocná zařízení,

ČSN EN 12953 – Válcové kotle,

ČSN EN 13445 – Netopené tlakové nádoby, tímto předpisem se řídí návrh parního kondenzátoru v této diplomové práci, bude rozvedena níže.

ČSN EN 13480 – Kovová průmyslová potrubí. [16]

Kromě zajištění bezpečnosti a spolehlivosti slouží evropská směrnice *PED 2014/68/EU* k volnému obchodu tlakových zařízení v rámci EU [17]. Mezi další významné předpisy patří například německé *AD 2000-Merkblätter*, anglické *PS 5500* nebo francouzské předpisy *CODAP*. [18]

4.1.2 ČSN EN 13445 Netopené tlakové nádoby

Tato norma stanovuje požadavky na materiály, konstrukci a výpočet, výrobu, kontrolu a zkoušení netopených tlakových nádob. Pojem „netopené“ tlakové nádoby vylučuje nádoby, které jsou vystaveny přímo vytvářenému teplu nebo plamenu dopadajícímu z topného tělesa, tím se ale nevylučují nádoby otápěné elektricky nebo proudem ohřevné látky. ČSN EN 13445 se skládá z více částí. Části 1 až 5 zahrnují pouze nádoby vyráběné z ocelí a ocelových odlitků (popisovaných v části 2 této normy). Část 6 se zabývá návrhem a výrobou tlakových nádob z litiny s kuličkovým grafitem, část 8 stanovuje požadavky na tlakové nádoby z hliníku a slitin hliníku. [19]

Termín „tlaková nádoba“ zahrnuje samotné těleso nádoby, například válcový plášť, až po příruby přivařených hrdel včetně, nebo hranu, na kterou má být prvním obvodovým svarem přivařeno potrubí nebo jiné prvky. Výrobce musí stanovit řadu předběžných podmínek ještě před tím, než bude tlaková nádoba navržena a vyrobena. Mezi tyto patří například podmínky, ve kterých bude nádoba provozována, případy zatížení, které je nutno uvažovat a další. [19]

ČSN EN 13445-3 Konstrukce a výpočet

Tato část stanovuje pravidla pro konstrukci a výpočet při působení vnitřního a/nebo vnějšího tlaku, pokud přichází v úvahu. Dále zohledňuje přídatná netlaková zatížení, lokální zatížení, stanovuje požadavky pro případy, kdy je nutno provádět posouzení na únavovou životnost. [19]

Existují různé přístupy při navrhování tlakových nádob:

- 1) DBF – Design by formula, neboli návrh na základě vzorců. Tomuto způsobu je věnována podstatná část normy ČSN EN 13445-3.
- 2) DBA – Design by analysis, návrh na základě analýzy. Slouží jako alternativa k DBF, také se používá pro hodnocení konstrukce a zatížení, které nejsou uvedeny v DBF. V praxi se analýza provádí v softwarech využívajících například metodu konečných prvků (popsána níže). V normě ČSN EN 13445-3 se tomuto přístupu věnuje příloha B, C.
- 3) DBE – Design by experiment, návrh na základě experimentu. Tento přístup často představuje zkoušku na roztržení, může být doplněna řízením deformace a zkouškou na únavu. DBE může být použita buď samostatně nebo jako doplněk k DBF. [19]

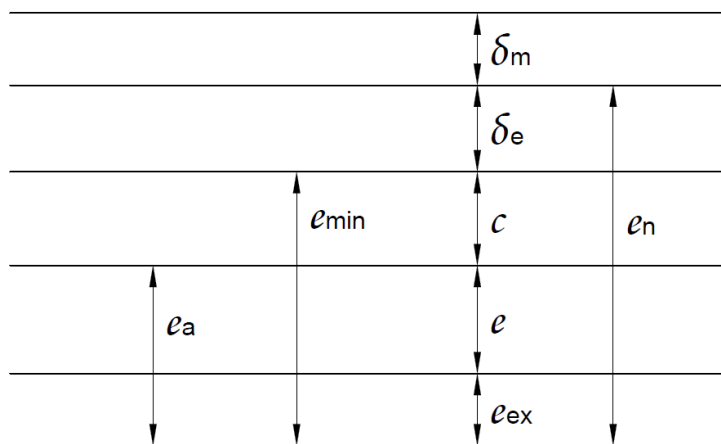
Tlaková nádoba bývá zatěžována za různých podmínek. Rozlišujeme tři skupiny zatížení:

- a) normální provozní zatížení (NPP) – jsou to taková zatížení, která působí během normálního provozu včetně najíždění a odstavování,
- b) mimořádná zatížení – zatížení při událostech, které se stanou s velmi nízkou pravděpodobností,
- c) zkušební zatížení – rozlišují se dva typy zkušebních zatížení: zkušební zatížení pro konečné posouzení (provádí se po dokončení výroby tlakové nádoby) a zkušební zatížení během provozu (opakované zkoušky během životnosti zařízení, jsou stanoveny uživatelem). [19]

Aby byla prověřena těsnost nádoby při jejím uvedení do provozu, je nutno provést tlakovou zkoušku (TZ). Zkušebním médiem bývá obvykle voda. Zkušební tlak je nutno udržovat nejméně 30 minut. Během hydraulické tlakové zkoušky musí zůstat vnější povrch nádoby suchý. Další požadavky na tlakové zkoušky udává část 5 normy ČSN EN 13445 [19].

Jedním z úkolů konstruktéra při návrhu tlakové nádoby je navrhnout tloušťky a pomocí zvolené metody návrhu zařízení vypočítat napětí nebo podle vhodnosti vypočítat poměry vytižení a ty porovnat s dovolenými hodnotami. [19]

Při provozu zařízení dochází ke korozi materiálu. Korozi se rozumí oxidace, okujení, abraze a všechny ostatní formy úbytku materiálu. Pokud se dá očekávat snížení tloušťky stěny nádoby v důsledku povrchové koroze nebo eroze na jednom nebo na druhém povrchu, způsobená produktem obsaženým v nádobě nebo vlivem atmosféry, je nutné stanovit odpovídající přídavek k tloušťce, která vyhovuje celkové životnosti komponent nádoby. Na obr. 20 je graficky vyjádřen vztah mezi definicemi tlouštěk [19].



Obr. 20 Vztah mezi definicemi tlouštěk [19]

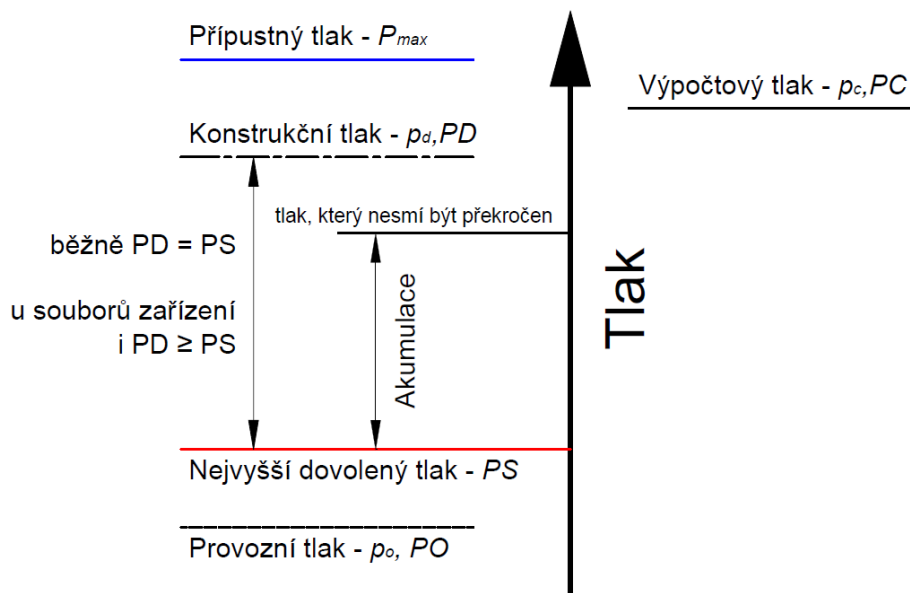
Legenda:

- e požadovaná tloušťka [mm],
- e_n jmenovitá tloušťka [mm],
- e_{min} minimální přijatelná výrobní tloušťka ($e_{min} = e_n - \delta_e$) [mm],
- e_a analyzovaná tloušťka ($e_a = e_{min} - c$) [mm],
- c přídavek na korozi nebo erozi [mm],
- δ_e absolutní hodnota možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce (např. vzaté z materiálových norem) [mm],
- δ_m přídavek na možné zeslabení během výrobního procesu [mm],
- e_{ex} tloušťka přidaná navíc pro doplnění na jmenovitou tloušťku [mm]. [19]

Korozní přídavek není požadován v případech, kdy může být koroze vyloučena. To je například při použití komponent tlakové nádoby z korozivzdorného materiálu vzhledem k obsahu nádoby a zatížení, případně při použití přiměřené ochrany. Za spolehlivou

ochranu proti korozi jsou považovány pouze zcela nepropustné, dostatečně tlusté a chemicky stabilní vrstvy s průměrnou životností odpovídající nejméně životnosti tlakové nádoby. Tenké vrstvy, jako například nátěry, galvanické pokovování nebo pocínování, které musí být během životnosti tlakové nádoby obnovovány, nesmí být používány. Pokud to nevyžaduje specifické korozivní prostředí, korozní přídatek se nepožaduje například pro trubky výměníků tepla a ostatní podobné části pro výměnu tepla. [19]

Při návrhu a provozu zařízení je nutno rozlišovat více druhů tlaků. Tyto druhy a obecné porovnání jejich velikostí jsou dle ČSN EN 764-1 schematicky zobrazeny na obr. 21. Následně jsou stručně popsány. [19], [20]



Obr. 21 Schematické znázornění tlaků [20]

- Provozní tlak (*Operating pressure, p_o, PO*)
 - tlak tekutiny, vyskytující se v průběhu stanovených pracovních podmínek,
- Nejvyšší dovolený tlak (*Maximum allowable pressure, PS*)
 - nejvyšší tlak, pro který je zařízení konstruováno,
- Konstrukční tlak (*Design pressure, p_d, PD*)
 - tlak v horní části každé komory tlakového zařízení, zvolený pro stanovení výpočtového tlaku každé komponenty,
- Výpočtový tlak (*Calculation pressure, p_c, PC*)
 - diferenční tlak používaný pro účely výpočtu komponent,
- Přípustný tlak (*Permissible pressure, P_{max}*)
 - tlak získaný analýzou tloušťky při výpočtové teplotě pro danou komponentu z výpočtového vzorce,
- Diferenční tlak (*Differential pressure*)
 - tlak, jehož algebraická hodnota se rovná rozdílu tlaků na obou stranách komponenty,
- Zkušební tlak
 - tlak, kterému je zařízení podrobeno při tlakové zkoušce,
- Akumule
 - maximální hodnota, o kterou smí tlak překročit nejvyšší dovolený tlak PS při činnosti pojistného zařízení. [20]

Níže je obecně demonstrována ukázka určení zkušební tlaku a dovoleného namáhání pro zkušební a mimořádná zatížení. Tento výpočet je dán podmínkami, stanovenými v tabulce 6-1 v normě ČSN EN 13445-3. Zde je obecně uvažována ocel jiná než austenitická, s tažností $A < 30 \%$. [19]

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/t}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right) \quad (5)$$

kde:

f_d – maximální hodnota dovoleného namáhání pro běžné provozní zatížení [MPa],

$R_{p0,2/t}$ – minimální smluvní mez kluzu 0,2 % při teplotě t °C [MPa],

$R_{m/20}$ – minimální mez pevnosti v tahu při teplotě 20 °C [MPa].

$$f_{test} = \left(\frac{R_{p0,2/t \text{ test}}}{1,05}\right) \quad (6)$$

kde:

f_{test} – maximální hodnota dovoleného namáhání pro zkušební zatížení [MPa],

$R_{p0,2/t \text{ test}}$ – minimální smluvní mez kluzu 0,2 % při zkušební teplotě t °C [MPa].

Zkušební tlak je dle ČSN EN 13445-5 vypočítán jako větší z hodnot:

$$P_t = 1,25 \cdot P_d \cdot \frac{f_d}{f_{Td}} \quad (7)$$

nebo

$$P_t = 1,43 \cdot P_s \quad (8)$$

kde:

P_t – zkušební tlak měřený v nejvyšším bodě komory nádoby ve zkušební poloze [MPa],

P_d – konstrukční tlak pro případ nejvyššího zatížení tlakem [MPa],

f_d – dovolené namáhání pro případy normálního provozního zatížení materiálu uvažované části při zkušební teplotě [MPa],

f_{Td} – dovolené namáhání pro případy normálního provozního zatížení materiálu uvažované části při teplotě T_d [MPa],

P_s – maximální dovolený tlak nádoby [MPa]. [19]

Pokud je tlaková nádoba zatěžována tlakem převážně necyklické povahy, není v takovém případě nutná analýza na únavu. Podmínkou je, aby byl počet plných tlakových cyklů nebo tzv. ekvivalentních plných tlakových cyklů menší nebo roven 500. [19]

$$n_{eq} \leq 500 \quad (9)$$

kde n_{eq} – ekvivalentní počet plných tlakových cyklů. [19]

Ten se vypočítá dle následujícího vzorce (neznámé vysvětleny na další straně):

$$n_{eq} = \sum n_i \left(\frac{\Delta P_i}{P_{max}}\right)^3 \quad (10)$$

kde

n_i počet tlakových cyklů [-],

ΔP_i rozkmit tlaku (menší než tlak P) [MPa],

P_{\max} maximální přípustný tlak vypočtený pro celou nádobu pro případ normálního provozního zatížení; hodnota P_{\max} může být pro zjednodušení nahrazena výpočtovým tlakem P [MPa]. [19]

Diplomová práce je zaměřena zejména na část 3 normy ČSN EN 13445, týkající se konstrukce a výpočtu. Návrh kondenzátoru se řídil přílohou C této normy, která je založena na kategorizaci napětí. Nejprve je nutno vypočítat napětí (často pomocí metody konečných prvků), ta jsou následně roztržena do kategorií. Napětí v každé kategorii jsou porovnávána s dovolenými hodnotami pro příslušnou kategorii a následně je zhodnoceno, jestli namáhání zařízení nebo jeho součásti vyhovuje normativnímu předpisu. V tab. 4 jsou zobrazena kritéria, podle kterých je vyhodnoceno napětí působící v daném zařízení. [19]

Tab. 4 Znázornění posuzovacích kritérií dle přílohy C normy ČSN EN 13445-3 [19]

	Kategorie napětí				
	Primární napětí			Sekundární membránové + ohybové napětí	Špičkové napětí
	Globální membránové napětí	Lokální membránové napětí	Ohybové napětí		
Popis (pro praktické příklady viz tabulku C-2)	Primární střední napětí vypočtené napříč tloušťkou stěny bez zohlednění diskontinuit a koncentrací napětí. Způsobené pouze mechanickými zatíženími.	Primární střední napětí vypočtené napříč tloušťkou stěny zohledňující výrazné diskontinuity, ale ne koncentrace napětí. Způsobené pouze mechanickými zatíženími.	Složka primárního napětí, která je proporcionální vzhledem ke vzdálenosti od těžiště řezu stěny. Nezahrnuje diskontinuity a koncentrace napětí. Způsobené pouze mechanickými zatíženími.	Napětí, které je samo se sebou v rovnováze, nutné pro splnění kontinuity konstrukce. Vyskytuje se u výrazných diskontinuit, ale neobsahuje koncentrace napětí. Může být způsobeno jak mechanickými zatíženími, tak i teplotními vlivy.	a) Dodatek k primárnímu nebo sekundárnímu napětí způsobený koncentrací napětí. b) Určitá teplotní napětí, která mohou způsobit únavu, ale ne deformaci.
Značka	P_m	$P_L^{1)}$	P_b	$Q (= Q_m + Q_b)$	F
Posouzení statických zatížení					
Posouzení únavy (pouze je-li požadováno)	Posouzení ⁴⁾ založené na: ⁵⁾ ⁷⁾ $(\Delta \sigma_{eq})_{p+Q}$ nebo $\max(\Delta \sigma_i)$ nebo $(\Delta \sigma_{eq})_{p+Q+F}$ ⁶⁾ ⁷⁾				

4.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (dále MKP) představuje dominantní numerickou metodu na řešení široké škály inženýrských problémů. Jedná se o přibližnou metodu, která je schopna vyřešit problémy popsané diferenciálními rovnicemi [21]. Mezi typy řešených úloh patří:

- napětově deformační analýza (při statickém, cyklickém i dynamickém zatěžování),
- stabilitní problémy (ztráta tvarové stability konstrukcí),
- kontaktní úlohy (rozložení tlaku s místě styku těles),
- vedení tepla a určení teplotní napjatosti,
- vlastní i vynucené kmitání soustav s tlumením i bez tlumení. [22]

Tato metoda vznikla v polovině 50. let 20. století. Široká škála úloh našla uplatnění v mnoha oblastech průmyslu – mechanika strojních konstrukcí, mechanika tekutin, termomechanika, simulace elektromagnetického pole a další. Pomocí MKP je možno simulovat chování daného tělesa (struktury), například ohyb nebo krut v důsledku působícího zatížení ještě před tím, než bude těleso vyrobeno a používáno. Při řešení problému dochází k nahrazení spojitého prostředí diskretním modelem, těleso je rozděleno na konečný počet prvků. Výpočtový čas značně závisí na nastavení modelu a hardwarovém vybavení. Při vhodném nastavení vstupních podmínek je možné spočítat velké množství úloh za relativně krátkou dobu. Tím dochází ke zkvalitnění a zefektivnění práce. [21]

Základní představou klasické pružnosti a pevnosti je rovnováha na nekonečně malém elementu. Metoda konečných prvků je odlišná v tom, že při řešení uvažuje prvek konečných rozměrů. Zároveň je založena na Lagrangeově principu – těleso je v rovnováze, když je jeho celková potenciální energie deformační soustavy minimální. [21]

Řešení libovolného problému pomocí MKP se dá obecně popsat třemi základními kroky:

- Preprocessing (příprava modelu, diskretizace),
- Solving (výpočet),
- Postprocessing (zobrazení a zpracování výsledů). [21]

Metoda konečných prvků slouží na řešení přímých úloh – u daného tělesa známe geometrii, materiál, zatížení, vazby na okolí a určujeme deformaci a napjatost (napětová analýza). Na základě napětové analýzy se hodnotí mezní stavy konstrukce. [21]

Přístupy k řešení přímé úlohy obecné pružnosti

Metoda konečných prvků úzce souvisí s obecnou pružností, proto budou následující řádky zaměřeny na popis řešení problému z pohledu obecné pružnosti. [21]

Obecná prostorová statická úloha představuje celkem 15 neznámých funkcí proměnných x , y , z :

- 3 posuvy: u , v , w ,
- 6 přetvoření: ε_x , ε_y , ε_z , γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{xz} ,
- 6 napětí: σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} . [21]

Tyto funkce jsou navzájem vázány systémem obecných rovnic pružnosti, které musí být splněny uvnitř řešené oblasti. Zároveň musí být splněny okrajové podmínky na hranici řešené oblasti. Na popis rovnic nebude zaměřena další pozornost. Za zmínku stojí

alespoň skutečnost, že rovnice jsou rozděleny na rovnice rovnováhy, fyzikální neboli konstitutivní rovnice a geometrické rovnice. [21]

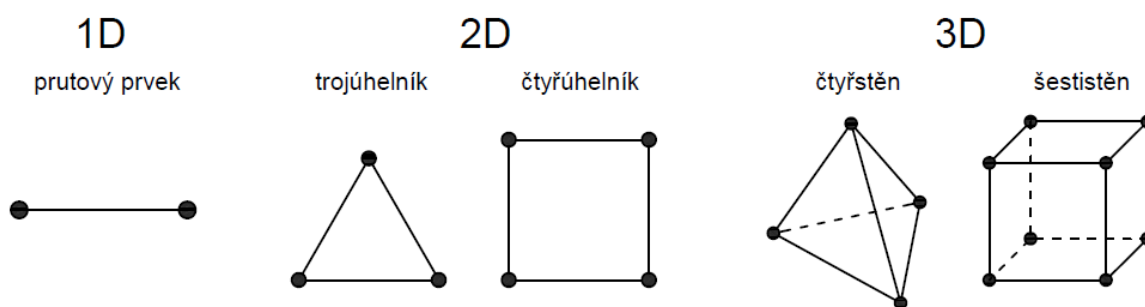
Existují různé přístupy k řešení přímé úlohy pružnosti, při řešení úloh je možno uvedené přístupy mezi sebou libovolně kombinovat, obecně jsou popsány níže. [21]

- *Matematická formulace problému*
 - Diferenciální – diferenciální rovnice,
 - Variační – hledá se stav, ve kterém energie analyzovaného tělesa dosahuje extrémní (stacionární) hodnoty – toto souvisí s numerickými metodami a MKP.
- *Nezávislé funkce pružnosti*
 - Deformační – neznáme složky posuvů,
 - Silové – neznáme složky napětí,
 - Smíšené – neznáme složky napětí a posuvů.
- *Způsob řešení problému*
 - Analyticky – výsledkem jsou spojitě funkce matematické analýzy, používá se diferenciální a integrální počet,
 - Numericky – diskretizace, hledání konečného počtu neznámých parametrů, přibližná aproximace hledané funkce, na tomto principu funguje MKP. [21]

U MKP jako numerické metody převládá variační formulace problému a deformační přístup (primární neznámé jsou složky posuvů). [21]

Výpočet založený na základě MKP je schopen rozlišovat různé typy prvků. Několik ukázek je na obr. 22. Jejich základní rozlišení podle tvaru je následující:

- 1D prutové prvky,
- 2D prvky – rovinné, rotačně symetrické,
- 3D prvky – prostorové,
- Skořepinové prvky – po tloušťce skořepiny pouze jedna vrstva prvků,
- Deskostěnové prvky,
- Speciální prvky – kontaktní, trhlinové a další. [21]



Obr. 22 Nejčastěji používané typy prvků u MKP [23]

4.3 Software ANSYS Workbench

ANSYS Workbench je softwarová platforma, poskytující komplexní simulační systémy, například simulace zatížení konstrukcí, proudění tekutin, vedení tepla, kmitání, chování magnetického pole a další. V softwaru je možné si jednak vymodelovat vlastní analyzovaný model nebo také importovat model vytvořený dříve v jiném CAD softwaru. Díky takové platformě je například možné provést simulaci chování zařízení ještě před tím, než bude vyrobeno a používáno. To ve svém důsledku může v mnoha případech usnadnit práci, tedy ušetřit čas i náklady. [24]

5 Pevnostní výpočet kondenzátoru

Před provedením pevnostního výpočtu je potřeba zvážit náročnost řešené úlohy. Na základě toho zvolit optimální postup, snažit se v co nejvyšší míře využít dostupný software a vybrat metody vhodné pro řešení problému.

5.1 Postup výpočtu

Dle zadané geometrie kondenzátoru byl vytvořen skořepinový model tělesa v softwaru *SolidWorks 2016*. Tento byl následně ve formátu *parasolid* importován do softwaru *ANSYS Workbench 17.2* za účelem provedení pevnostní analýzy pomocí *metody konečných prvků*. Formát *parasolid* byl vybrán poté, co selhaly možnosti přímého exportu modelu ze softwaru *SolidWorks* do prostředí *ANSYS Workbench* přes implementované uživatelské rozhraní softwaru *SolidWorks*.

Pevnostní výpočet je složen ze dvou částí. Nejprve je na kondenzátor v teplotní úloze (*Steady-State Thermal*) aplikováno teplotní pole, které bylo získáno z tepelně-hydraulického výpočtu v softwaru HTRI. Následně je toto pole importováno do strukturální úlohy (*Static Structural*), ve které je zjišťováno napětí v kondenzátoru. Nakonec je provedeno vyhodnocení zařízení pomocí kategorizace napětí pro jeden vybraný stav, zde pro normální provozní podmínky 1 (NPP1). Pro kompletní posouzení přípustnosti konstrukce z hlediska pevnosti a životnosti by bylo dále nezbytné analyzovat ještě všechny další stavy, které jsou zde podstatné, například tlakovou zkoušku zařízení a zatížení kondenzátoru vnějším tlakem.

Pro NPP1 byl v mezitrubkovém prostoru předpokládán nejvyšší dovolený tlak 1600 kPa, tedy nejvyšší možný tlak syté páry vstupující do kondenzátoru.

Druhým krajním případem, pro který by mohl být proveden výpočet je provozní stav NPP2. V tomto případě by v mezitrubkovém prostoru mohlo být uvažováno podtlak (zatížení vnějším tlakem), jak je zmíněno výše. Absolutní tlak by mohl být uvažován například 5 kPa. Takový tlak se běžně za provozu vyskytuje v kondenzátorech instalovaných v elektrárnách za turbínou. Tyto podmínky jsou zmíněny v tab. 1.

Při provedení pevnostního výpočtu pro NPP1 bylo zároveň zadáno teplotní zatížení trubek. Při pevnostním výpočtu v softwaru *ANSYS Workbench* byly využity výsledky předchozích výpočtů – teploty na vnějším povrchu trubek. Ty byly zadány do softwaru *ANSYS Workbench* a následně byl zjištěn vliv teplotního zatížení na pevnost zařízení.

Po provedení pevnostního výpočtu kondenzátoru jako celku dle MKP byla zaměřena pozornost na vybrané části kondenzátoru a ty následně posouzeny.

5.2 Výpočtový model

Těleso kondenzátoru bylo vymodelováno jako skořepinový model. V praxi je tento postup běžně používán. Aby mohla být provedena pevnostní analýza pomocí MKP, je jednotlivým plochám (stěnám) modelu ve výpočtovém programu (v tomto případě *ANSYS Workbench*) přiřazena tloušťka. Skořepinový model je zjednodušený a uvažuje pouze jeden prvek po tloušťce stěny. Tím se významně redukuje celkový počet prvků tělesa, což ve svém důsledku výrazně zjednodušuje výpočet a snižuje výpočtový čas. Výsledky pevnostního výpočtu skořepinového modelu mohou být za určitých okolností dostačující.

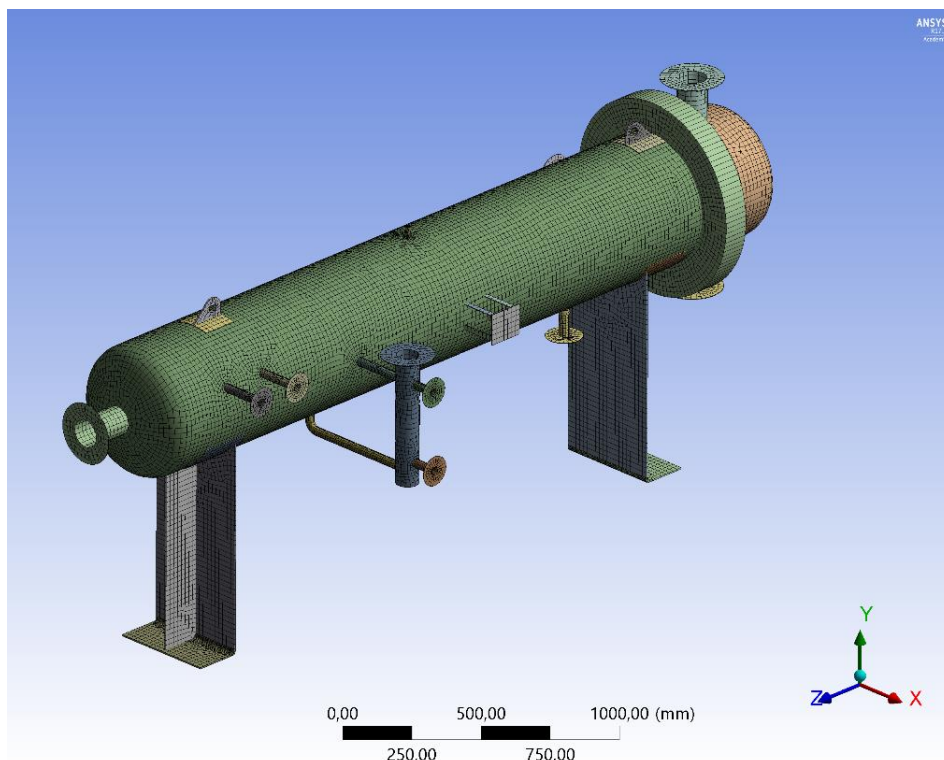
Při výpočtu metodou konečných prvků výpočtový software rozdělí analyzované těleso na jednotlivé prvky, které jsou spojeny v uzlech a ty společně vytvářejí síť (*Mesh*). Tvorba sítě je pro výpočet zásadní, ovlivňuje přesnost výsledků a délku výpočtového času. Čím vyšší je počet prvků, tím vyšší je výpočtový čas, na druhou stranu může takový

model poskytovat přesnější výsledky. Důležitými aspekty při tvorbě sítě jsou tvar, velikost a celkový počet prvků. *ANSYS Workbench* nabízí množství funkcí, díky kterým je možno detailně specifikovat požadovanou síť.

Při tvorbě sítě modelu kondenzátoru byly provedeny pokusy vytvořit síť více různými způsoby, např. pomocí funkce *Face Meshing*. Tyto snahy se mnohdy jevily jako nevyhovující. Proto byl nakonec využit příkaz *Sizing*, konkrétně *Body Sizing* pro trubky a vodicí tyče, dále *Edge Sizing* pro hrany trubek, otvorů v trubkovnici a přepážkách. Velikost prvků trubek byla specifikována na 4 mm, hrany výše uvedených částí na 10 prvků po obvodu. Zbytek sítě byl vygenerován automaticky. Automaticky vytvořená síť byla na mnoha součástech pravidelného – čtvercového tvaru. Ostatní vytvořené elementy měly tvar čtyřúhelníku, případně trojúhelníku. Při tvorbě sítě bylo také potřeba zkontrolovat, aby na sebe elementy v místě styku ploch navazovaly.

Parní kondenzátor obsahuje 65 trubek, přičemž každá má dva chody. Tím výrazně narostl počet prvků a výpočtová náročnost úlohy. Celkem se těleso kondenzátoru skládalo z 951 182 prvků a 951 660 uzlů. Výpočet bylo možno provést pouze u softwaru s licencí pro neomezený počet prvků, v tomto případě licence *ANSYS Academic Research* a *ANSYS Academic Research Mechanical*.

Síť celého kondenzátoru na je vidět na obr. 23, síť jednotlivých součástí je ve výsledcích pevnostní analýzy pro NPP1 v kap. 5.5.3 – 5.5.8.



Obr. 23 Síť modelu tělesa kondenzátoru

5.3 Teplotní analýza

V této kapitole je popsáno, jakým způsobem byly jednotlivé části kondenzátoru teplotně zatíženy a popsán způsob, jakým bylo aplikováno teplotní pole na trubkový svazek. Následuje zobrazení výsledků teplotní analýzy včetně zhodnocení.

5.3.1 Vstupní parametry

Cílem teplotní úlohy bylo na model aplikovat nejnepríznivější teploty, které mohou na kondenzátoru během provozu nastat. V tab. 5 jsou uvedeny teploty aplikované na většině součástí kondenzátoru a v tab. 6 je možno vidět hodnoty teplot, definovaných na hrany jednotlivých trubek, na základě kterých bylo vytvořeno teplotní pole trubkového svazku.

Tab. 5 Teploty definované na jednotlivých částech kondenzátoru

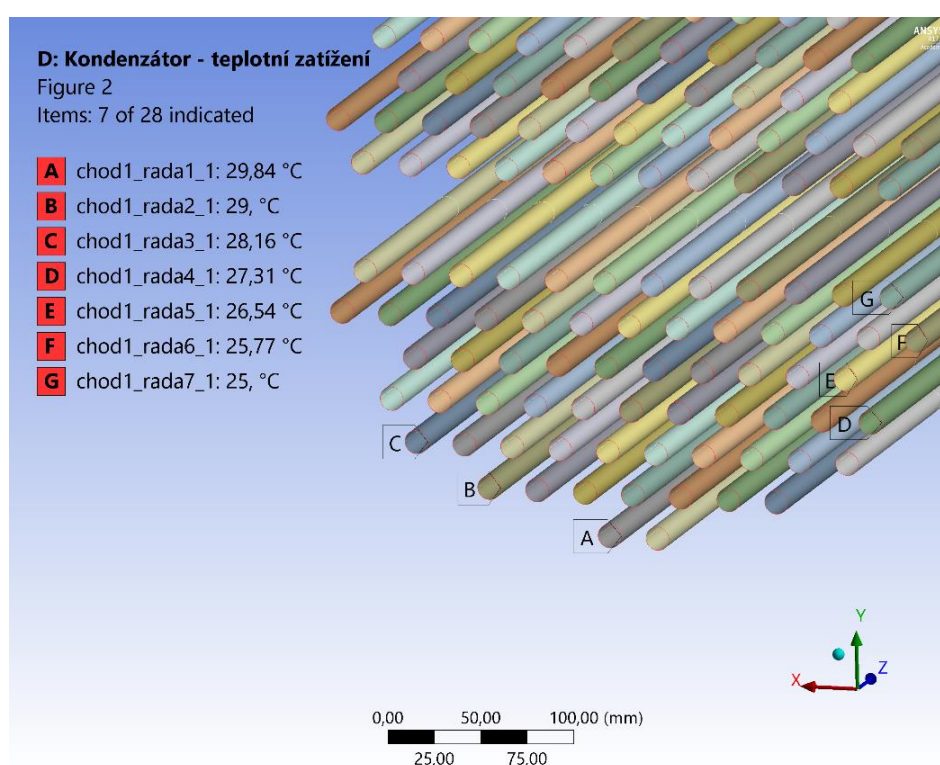
Součást	Teplota [°C]
Plášť	202
Trubkovnice	202
Přepážky	202
Vodicí tyče	202
Podložený plech sedlových podpor	202
Hrdlo N1, N4, N5	202
Odvzdušnění N6	202
Sestava měření hladiny N7	202
Hrdlo N8	202
Závěsná oka	202
Komora	110
Přepážka komory	110
Hrdlo N2, N3	110
Sedlové podpory	20

Do mezitrubkového prostoru proudí pára o maximální teplotě 202 °C, proto byla tato teplota aplikována na plášť a všechny součásti k němu přiléhající, včetně trubkovnice a rozpěrných tyčí. Nejvyšší dovolená teplota komory, přepážky komory a hrdel N2 a N3 představuje 110 °C.

Teploty na vnějším povrchu trubek T_{w2} vzrůstají konstantně, viz příloha 2. Díky tomu bylo možno definovat teploty pro trubkový svazek zjednodušeným způsobem – na hranu trubky, vždy na začátku a na konci přímé části. Software následně automaticky vytvořil lineární teplotní pole s konstantním rozložením teplot v podélném směru trubek. Tyto podmínky byly definovány pro každou řadu trubek daného chodu na začátku a na konci přímé části. Vzhledem k tomu, že se trubkový svazek parního kondenzátoru skládá ze dvou chodů, přičemž každý chod představuje 7 řad trubek, bylo takto definováno celkem 28 okrajových podmínek, viz tab. 6. Jak již bylo zmíněno v kap. 3, na trubky byly aplikovány nejnepríznivější možné teploty, tedy teploty na vnějším povrchu trubek T_{w2} . Na obr. 24 je zobrazena ukázka aplikace vstupních teplot prvního chodu pro řady 1-7.

Tab. 6 Teploty aplikované na trubkový svazek

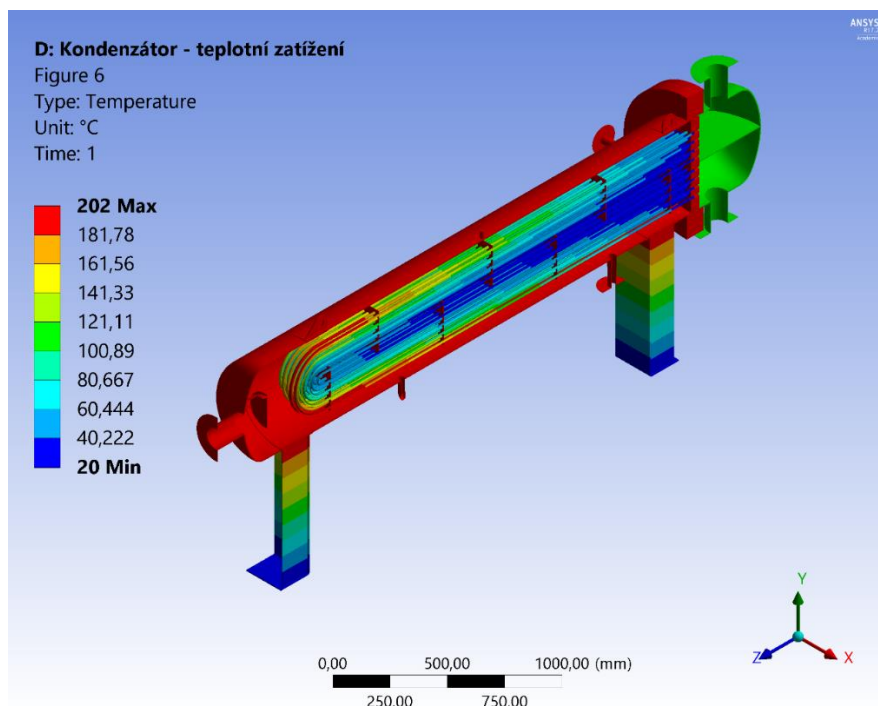
Chod 1				Chod 2			
Vstup		Výstup		Vstup		Výstup	
Řada	Teplota [°C]	Řada	Teplota [°C]	Řada	Teplota [°C]	Řada	Teplota [°C]
1	29,84	1	202,00	1	202,00	1	39,28
2	29,00	2	165,50	2	165,60	2	38,18
3	28,16	3	128,99	3	129,19	3	37,07
4	27,31	4	92,49	4	92,79	4	35,96
5	26,54	5	75,77	5	76,06	5	34,94
6	25,77	6	59,06	6	59,34	6	33,93
7	25,00	7	42,35	7	42,62	7	32,91



Obr. 24 Aplikace vstupních teplot prvního chodu pro řady 1-7

5.3.2 Výsledky teplotní analýzy

Na obr. 25 je zobrazen výsledek teplotního zatížení parního kondenzátoru.



Obr. 25 Průřez kondenzátorem zobrazující výsledné teplotní zatížení kondenzátoru

Jak je zřejmé z obr. 25, plášť a jemu přilehlé součásti mají aplikovány konstantní konzervativní teplotu 202 °C. Červená tělesa uvnitř pláště, kolmá na osu pláště, jsou přepážky, pro které byla definována shodná teplota. Z obrázku je také zřejmé rozložení teplot v trubkovém svazku. Trubky ve „vnější“ části trubkového svazku jsou výrazně více teplotně zatěžovány než trubky ve „vnitřní“ části svazku.

5.4 Přístup při řešení pevnostního výpočtu

Níže je popsán přístup, který byl zvolen pro řešení pevnostního výpočtu parního kondenzátoru.

5.4.1 Obecně

Jedním z možných přístupů, jak hodnotit zařízení, je pevnostní analýza prostřednictvím kategorizace napětí. Výsledná působící napětí jsou rozdělena do kategorií, viz tab. 4 a následně porovnávána s dovolenými hodnotami. Pro stanovení primárních globálních a lokálních napětí bylo přistoupeno k určení těchto napětí v analýze, která zahrnovala teplotní zatížení. Přestože norma udává, že pro primární napětí nejsou pro konstrukční zatížení brány v úvahu přídavná napětí od teploty (sekundární napětí), zde byly přidány k primárním napětím a porovnány s přísnější podmínkou napětí 1,5·f. K tomuto kroku bylo přistoupeno z důvodu zajištění konzervativnosti výpočtu s ohledem na stav, kdy napětí z analýzy vyhovují i této přísnější podmínce. V případě, kdy by daná podmínka nevyhovovala, bylo by nezbytné provést rozklad působících napětí na pouze primární a sekundární napětí a provést znovu posouzení dle příslušných pravidel.

Pro stav NPP1 byly definovány okrajové podmínky, proveden pevnostní výpočet (*Static Structural*) a následné vyhodnocení.

Následující strany dokumentují kategorizaci napětí vybraných oblastí kondenzátoru. V místech ostrých hran a ostrých spojů skořepinových ploch nelze vyhodnocovat napětí

z důvodů limitů daných využitým modelem, tedy využitím skořepinového modelu. Pro detailní posouzení těchto míst by bylo nezbytné provést následné analýzy na modelu pro tuto situaci vhodnějšího. Toto posouzení by proběhlo na navazujícím modelu vytvořeném jako takzvaný „submodel“, tedy model sestavený z objemových elementů, na který by byly vhodnou okrajovou podmínkou přeneseny silové a momentové účinky z globálního modelu. Provedení těchto detailních analýz nebylo cílem této práce a nejsou tedy v práci obsaženy. Je nezbytné zmínit, že pro dosažení shody s využitým normalizovaným přístupem nelze bez těchto analýz rozhodnout o pevnostní únosnosti a bezpečnosti zkoumaného stavu.

Při řešení výpočtu je nutné také zvážit použití kontaktů. Pro pevnostní výpočet kondenzátoru byl mezi trubkami a přepážkami v místě dotyku definován kontakt typu *Joint*. U něj byl omezen pohyb ve dvou osách x , y , a povolen v podélné ose z , takže trubky mohly volně dilatovat. Zároveň byla trubkám umožněna rotace ve všech směrech, tím bylo možno simulovat ohyb trubek jako odezvy na teplotní zatížení. Všechny ostatní kontakty byly specifikovány na typ *Bonded*. Kontakty byly celkově nastaveny tak, že řešení pevnostního výpočtu je považováno za lineární. Úlohu tedy můžeme řešit dle přílohy C normy ČSN EN 13445-3 [19].

5.4.2 Kategorizace napětí

Kategorizace napětí představuje způsob vyhodnocení vhodnosti konstrukce dle normy ČSN EN 13445-3, Příloha C. Podmínkami pro použití kategorizace jsou: lineární elastická úloha, malé deformace a isotropní materiál. Tyto podmínky byly v případě kondenzátoru splněny, proto je možné kategorizaci použít.

Pevnostní výpočet zařízení jako celku i jeho částí bylo v softwaru *ANSYS Workbench* provedeno prostřednictvím funkce *Stress Intensity*, což je výpočet redukovaného napětí podle podmínky *Tresca*, hypotéza maximálních smykových napětí $\max \tau$. Pro účely kategorizace bylo využito funkcí softwaru. Ten nabízí výpočet ekvivalentního membránového napětí pro střednicovou plochu tělesa, parametr *Middle*. Dále je možné zobrazit ekvivalentní napětí na vnitřním a vnějším povrchu tělesa pomocí specifikace *Top/Bottom*. Tímto způsobem se určí součet membránového a ohybového napětí jako maximální z těchto hodnot, což zaručí konzervativní stanovení tohoto součtu napětí.

Po provedení pevnostního výpočtu v softwaru *ANSYS Workbench* bylo provedeno rozlišení kategorií napětí:

- P_m – globální primární membránové napětí [MPa],
- P_L – lokální primární membránové napětí [MPa],
- P – primární napětí, součet membránového a ohybového napětí [MPa],

Tato napětí byla následně považována přímo za ekvivalentní napětí, tedy

$$P_m = (\sigma_{eq})_{Pm},$$

$$P_L = (\sigma_{eq})_{PL},$$

$$P = (\sigma_{eq})_P.$$

Tyto hodnoty napětí byly následně porovnány s hodnotou f_d , kde:

f_d – dovolené namáhání materiálu vyhodnocované části při provozní teplotě [MPa].

Podmínky kategorizace napětí:

$$(\sigma_{eq})_{pm} \leq f_d \quad (11)$$

$$(\sigma_{eq})_{PL} \leq 1,5f_d \quad (12)$$

$$(\sigma_{eq})_P \leq 1,5f_d \quad (13)$$

Rozlišení lokálního a globálního napětí je dáno vzdáleností od diskontinuity. Ta je definována rovnicí (14) [19].

$$L = 1,0 \cdot \sqrt{R \cdot e_a} \quad (14)$$

kde

L – vzdálenost od místa diskontinuity [mm],

R – poloměr zakřivení skořepiny [mm],

e_a – analyzovaná tloušťka [mm].

Napětí byla posouzena na obou stranách stěny nádoby a do výše uvedených vztahů byla za ekvivalentní napětí σ_{eq} vždy dosazena vyšší zjištěná hodnota. Pro účely této práce nebylo uvažováno s výpočtem a posouzením únavového poškození. Do vyhodnocení tedy nebyla zařazena špičková napětí F.

5.5 Pevnostní výpočet pro NPP1

Dříve než bude proveden pevnostní výpočet, je potřeba znát vstupní parametry. Na základě toho jsou zadány vazby a zatížení zařízení, které jsou později vyhodnoceny. V této podkapitole je popsán pevnostní výpočet pro NPP1. Jedná se o stav, kdy může v kondenzátoru za provozu nastat nejvyšší dovolený tlak.

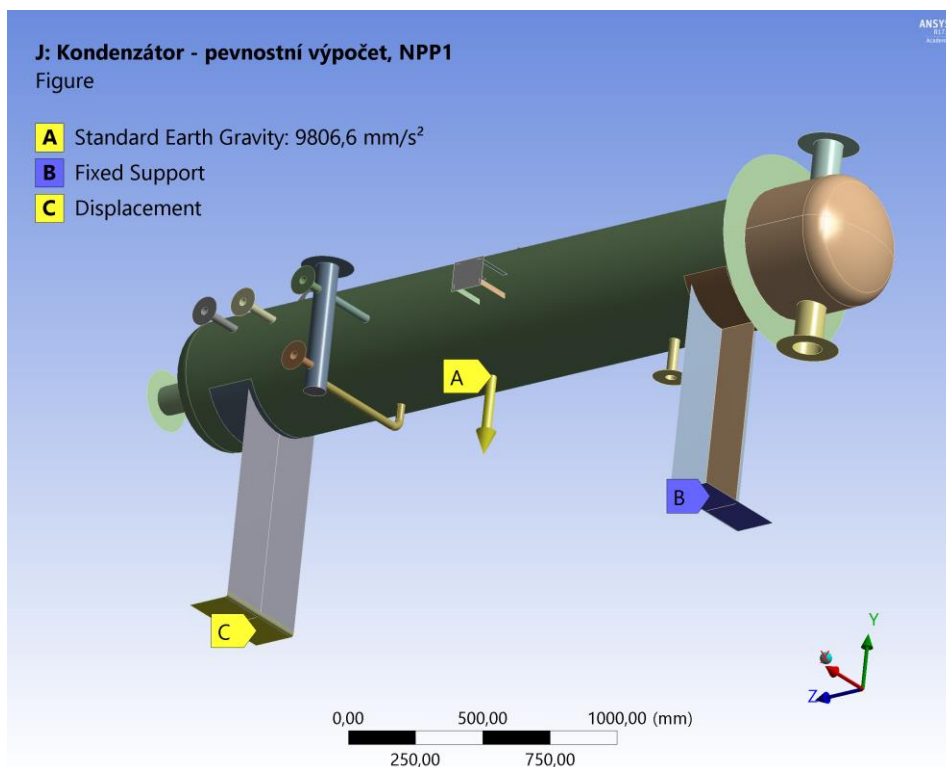
5.5.1 Vstupní parametry

Jako reprezentativní stav pro představení principu výpočtu a jeho vyhodnocení byl vybrán stav normálních provozních podmínek 1 (NPP1), přičemž byl uvažován nejvyšší dovolený tlak v mezitrubkovém prostoru kondenzátoru $p_{MP, NPP1} = 1600$ kPa. Tlak v trubkovém prostoru a teplotní pole ve všech částech kondenzátoru je pro všechny provozní stavy kondenzátoru uvažován konstantní. Shrnutí je v tab. 7.

Tab. 7 Zátěžné okrajové podmínky pro stav NPP1

Zatěžovací stav	NPP1
Oblast	Tlak [kPa]
Mezitrubkový prostor (MP)	1600
Trubkový prostor (TP)	700

Na obr. 26 jsou zobrazeny geometrické okrajové podmínky kondenzátoru pro pevnostní výpočet. Pro těleso byla zadána tíhová síla. Sedlová podpora blíže trubkovnici byla vetknutá, pozice druhé sedlové podpory byla omezena posuvnou vazbou.

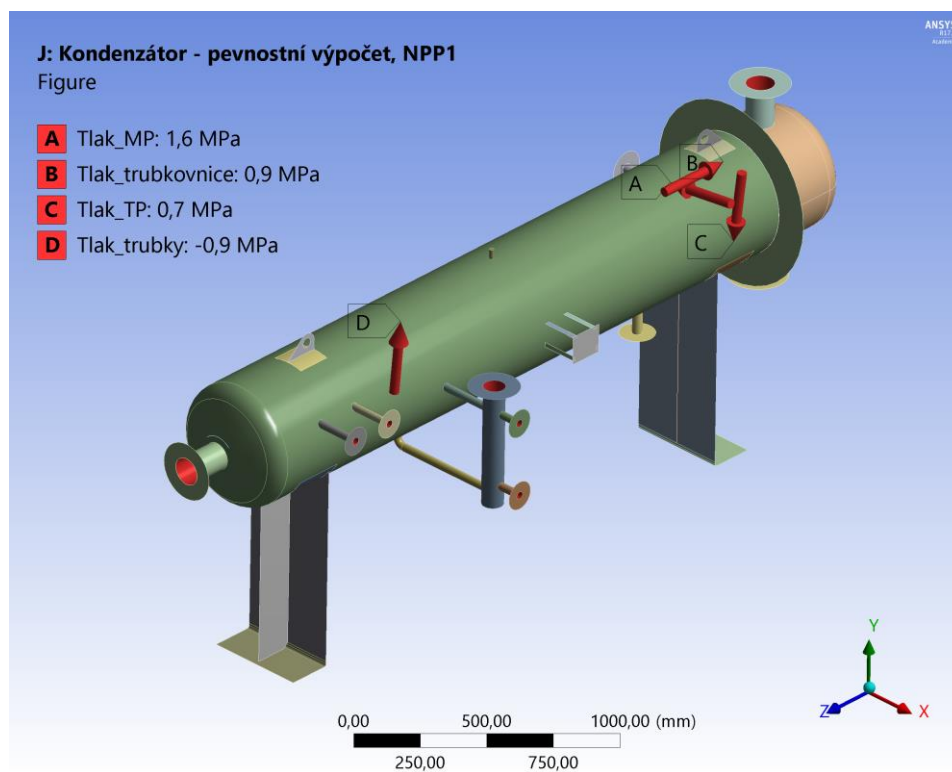


Obr. 26 Geometrické okrajové podmínky kondenzátoru pro pevnostní výpočet

Obr. 27 popisuje zátěžné okrajové podmínky – zatížení tlakem. Mezi ně patří:

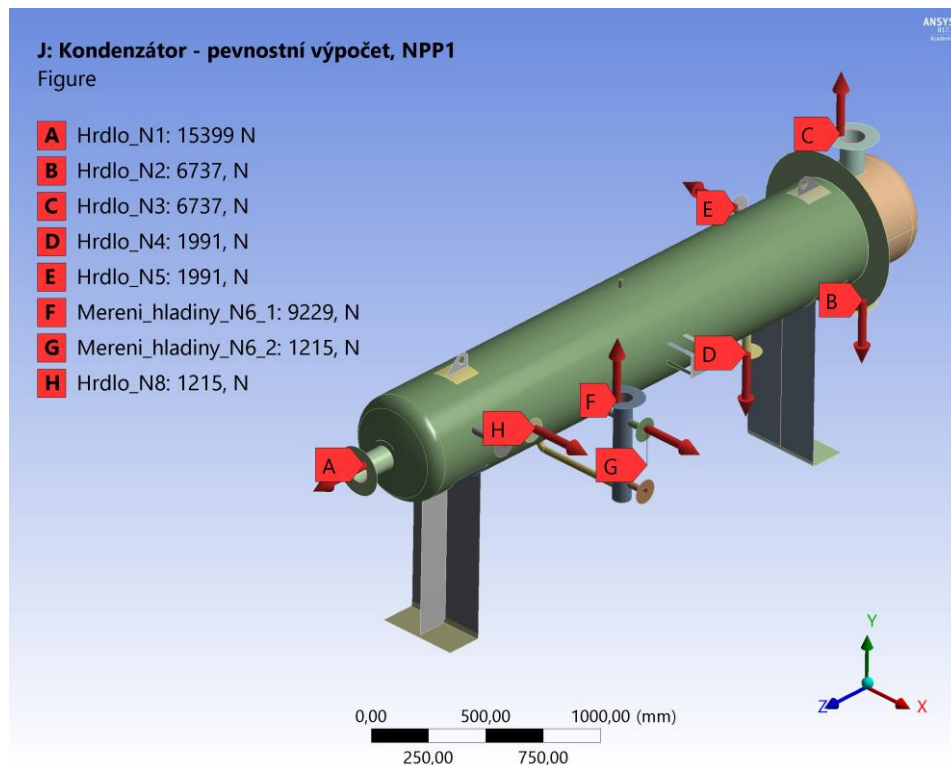
- Tlak 1,6 MPa v mezitrubkovém prostoru (MP),
- Tlak 0,7 MPa v trubkovém prostoru (TP),

- Tlak 0,9 MPa na trubkovnici ze strany MP, tlak je dán jako rozdíl mezi MP a TP: $1,6 - 0,7 = 0,9$ MPa,
- Tlak -0,9 MPa na trubky, působí tlak uvnitř trubek, tlak v MP je vyšší, proto má výsledný tlak zápornou hodnotu: $0,7 - 1,6 = -0,9$ MPa.



Obr. 27 Kondenzátor zatížený vnitřním tlakem

Při zatížení tlakové nádoby bývá uvažován stav, kdy jsou hrdla uzavřena. V tomto případě hrdla uzavřena nebyla. Proto bylo nutné zatížení na plochy uzavřených hrdel nahradit ekvivalentním zatížením. Tlak působící na plochu zavřených hrdel byl nahrazen ekvivalentní silou. Ta byla aplikována na hranu hrdla. Výsledné zatížení je zobrazeno na obr. 28.

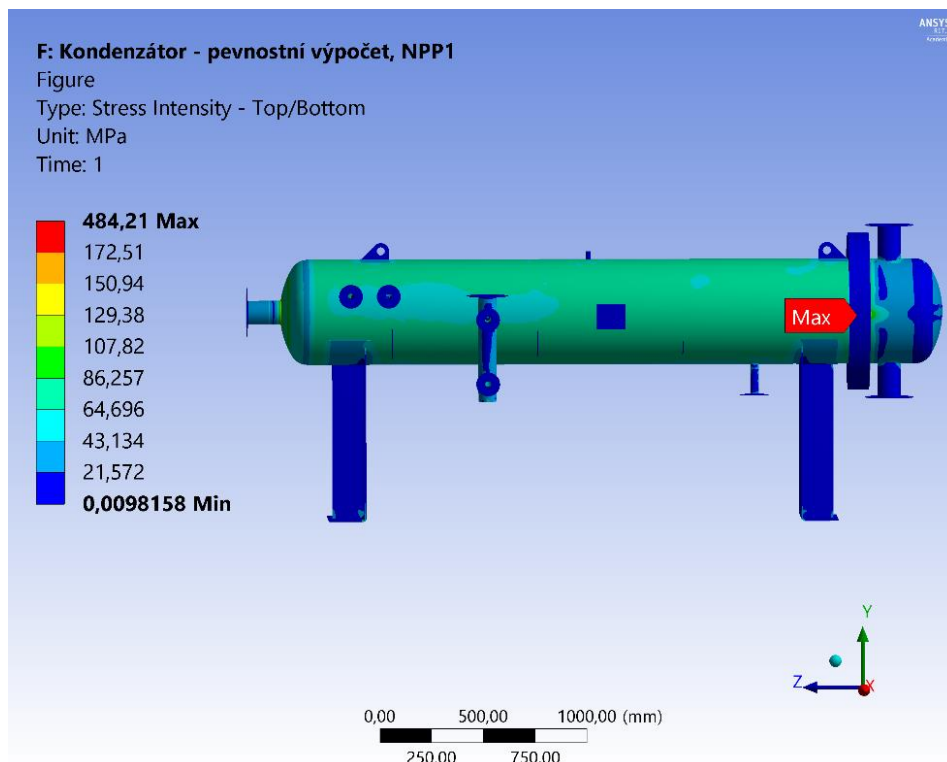


Obr. 28 Hrdla kondenzátoru zatížena ekvivalentními silami

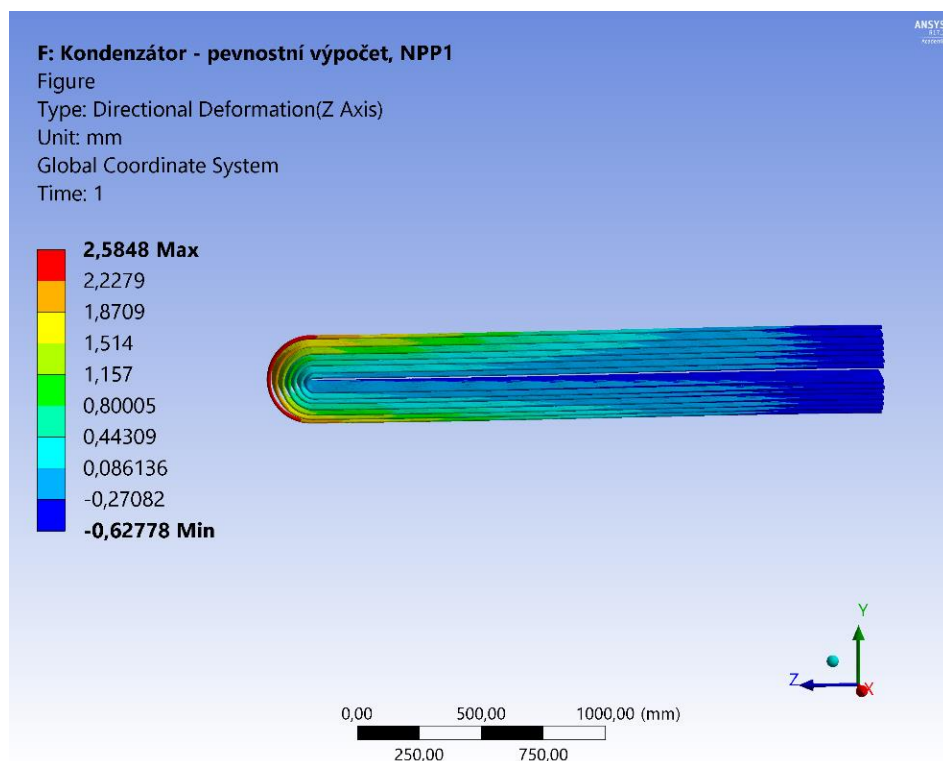
Při pevnostním výpočtu zařízení za provozních podmínek je nutno uvažovat nejméně příznivý stav materiálu. Proto je nutno analyzovat nejmenší tloušťku materiálu, která je uvažována pro provoz zařízení. Od jmenovité hodnoty e_n byla odečtena záporná výrobní tolerance δ_m a korozní přírůstek c .

5.5.2 Výsledky statické analýzy pro NPP1

Na obr. 29 je zobrazeno napětí na celém tělese kondenzátoru, na obr. 30 deformace trubkového svazku v podélném směru.

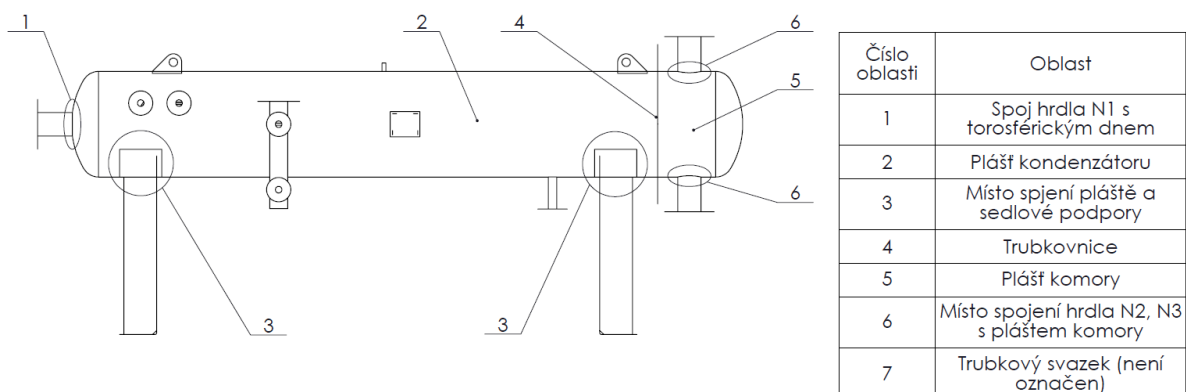


Obr. 29 Ekvivalentní napětí na tělese parního kondenzátoru



Obr. 30 Deformace trubkového svazku v podélném směru

Na obr. 31 jsou na modelu kondenzátoru schematicky znázorněny oblasti, na které byla na základě posouzení výsledků zaměřena pozornost a u kterých byla následně provedena kategorizace napětí.



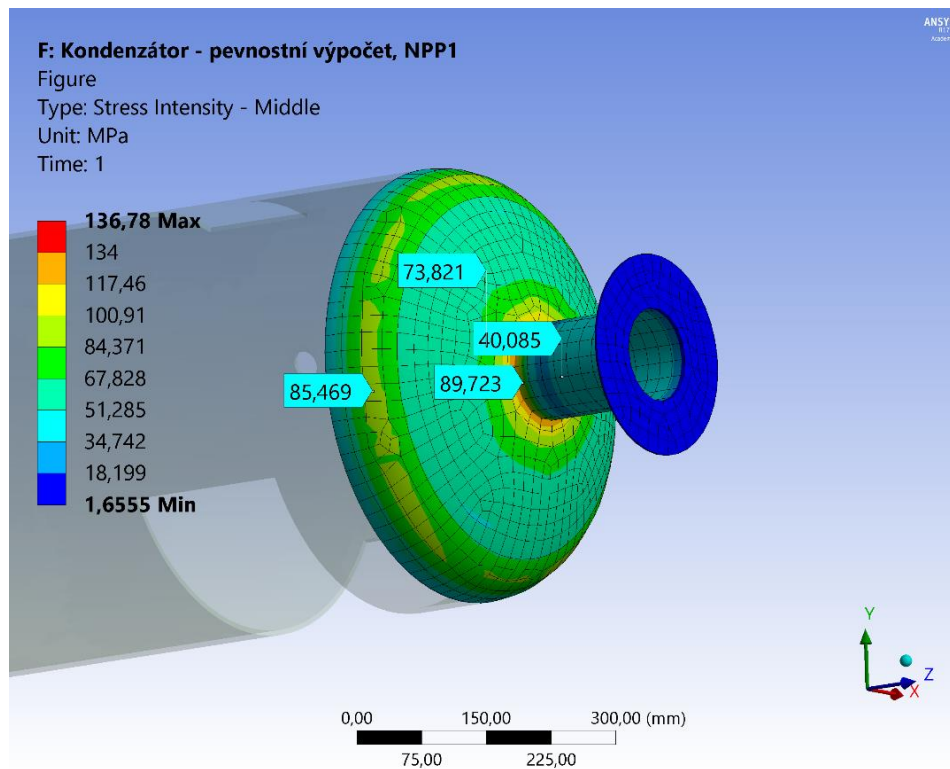
Obr. 31 Zobrazení oblastí vybraných pro kategorizaci napětí

5.5.3 Oblast 1 – spoj hrdla N1 s torosférickým dnem

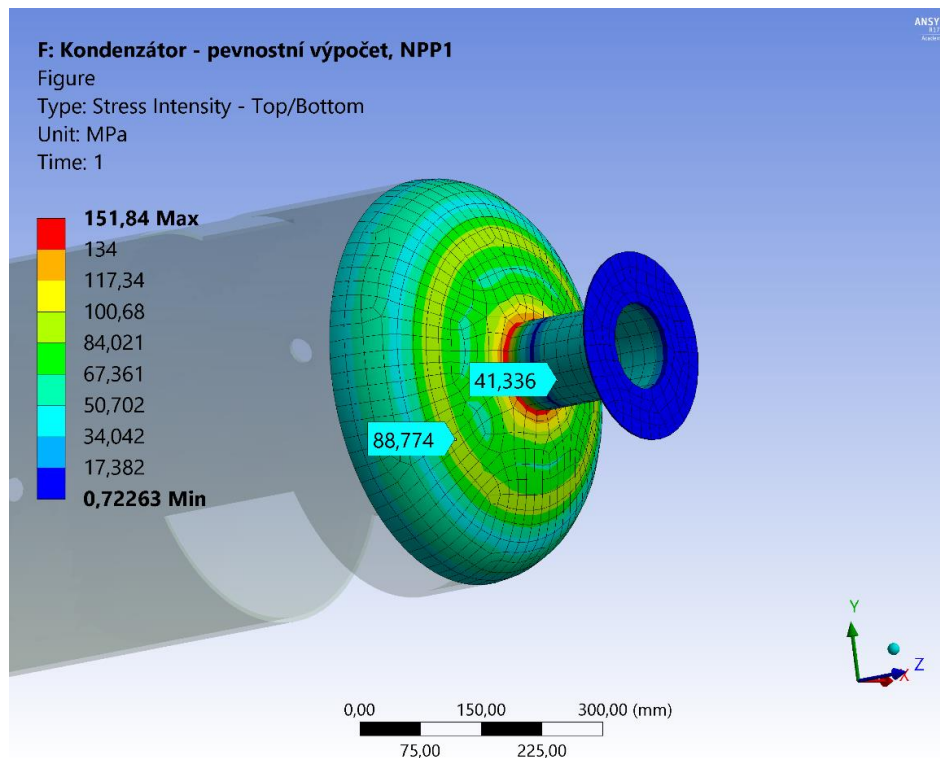
Na obr. 32 jsou zobrazena působící ekvivalentní membránová napětí, následně lze na obr. 33 vidět součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí. Hrdlo N1 slouží jako vstup páry do mezitrubkového prostoru kondenzátoru. V tab. 8 jsou shrnuty hodnoty kategorizace napětí pro hrdlo N1, v tab. 9 hodnoty pro torosférické dno.

Materiál součástí:

- Hrdlo N1 – P235GH
- Torosférické dno – P265GH



Obr. 32 Ekvivalentní membránová napětí působící v místě spoje hrdla N1 s torosférickým dnem



Obr. 33 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí působící v místě spoje hrdla N1 s torosférickým dnem

Tab. 8 Hodnoty kategorizace napětí pro hrdlo N1

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]	Stav	
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	40	$\leq f$	119	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	90	$\leq 1,5 f$	179	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	41	$\leq 1,5 f$	179	VYHOVUJE

Tab. 9 Hodnoty kategorizace napětí pro torosférické dno

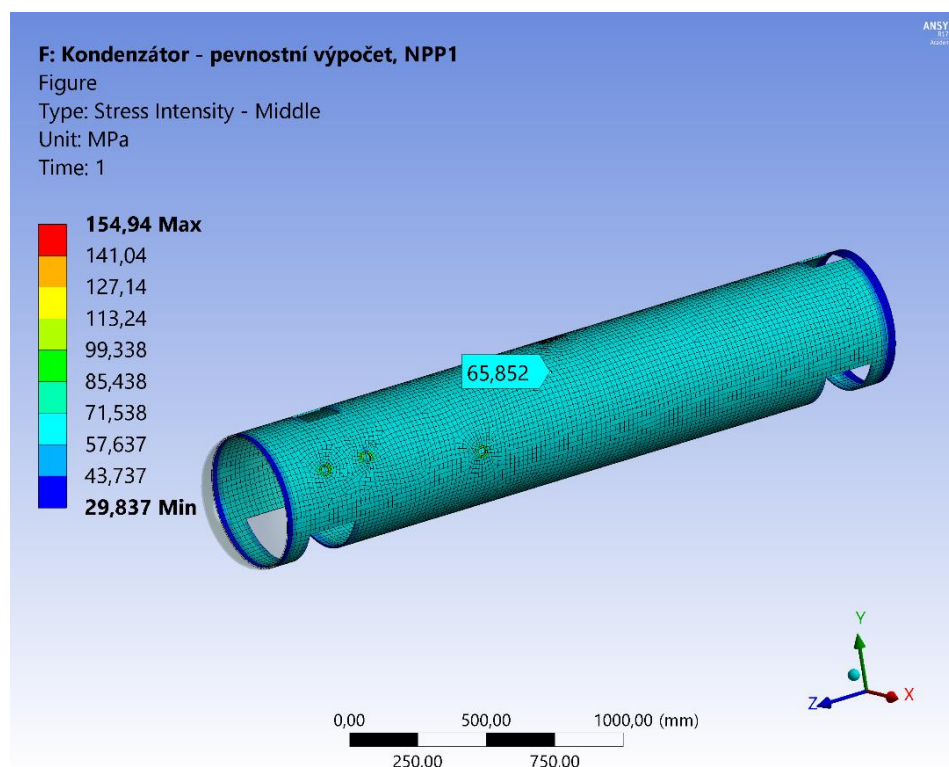
Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]	Stav	
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	85	$\leq f$	134	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	74	$\leq 1,5 f$	201	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	89	$\leq 1,5 f$	201	VYHOVUJE

V místě napojení hrdla N1 vznikla očekávaná zvýšená lokální napětí. Všechna primární napětí po provedení kategorizace napětí vyhovují normě ČSN EN 13445 [19].

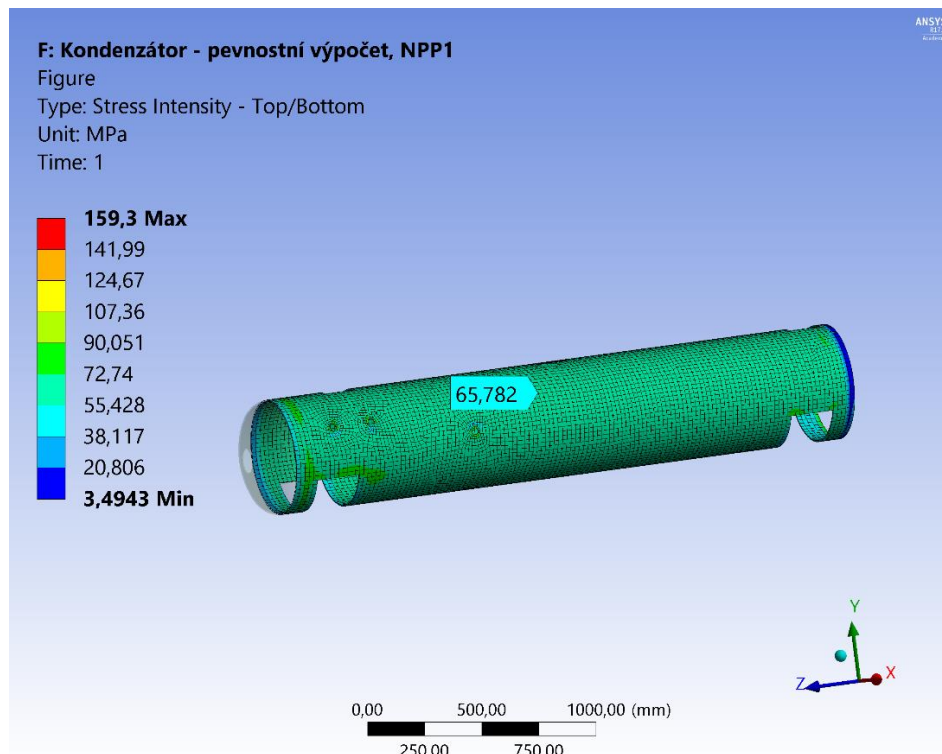
5.5.4 Oblast 2 – plášť kondenzátoru

Kategorizace napětí pro oblast 2 je zaměřena čistě na plášť kondenzátoru, na oblasti vzdálené od výrazných konstrukční diskontinuit. Lokální napětí jsou v tomto případě zanedbána a nejsou vyhodnocena. Na obr. 34 jsou zobrazena působící ekvivalentní membránová napětí, dále lze na obr. 35 vidět součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí. Hodnoty kategorizace napětí pro plášť kondenzátoru jsou shrnuty v tab. 10.

Materiál pláště: P265GH.



Obr. 34 Ekvivalentní membránová napětí působící v plášti kondenzátoru



Obr. 35 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí v plášti kondenzátoru

Tab. 10 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť kondenzátoru

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	66	$\leq f$	134	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	66	$\leq 1,5 f$	202	VYHOVUJE

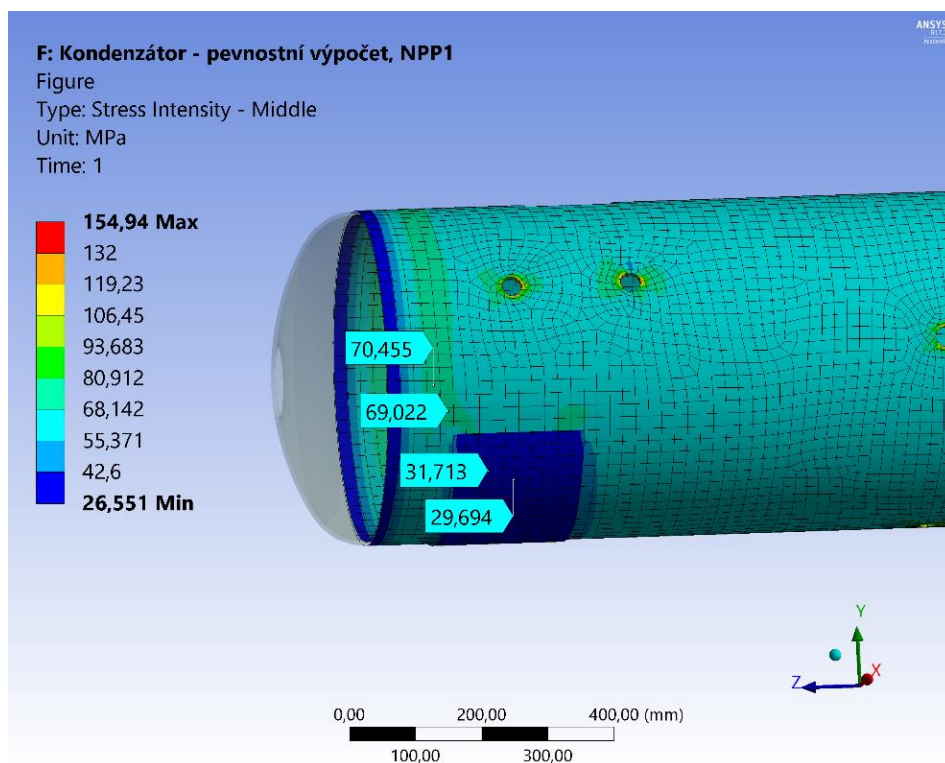
Vzhledem k tomu, že napětí $(\sigma_{eq})_{Pm}$ a $(\sigma_{eq})_P$ jsou shodná, je zřejmé, že v oblasti mimo diskontinuity působí pouze membránové napětí. Primární napětí po provedení kategorizace napětí vyhovují normě ČSN EN 13445 [19].

5.5.5 Oblast 3 – místo spojení pláště a sedlové podpory

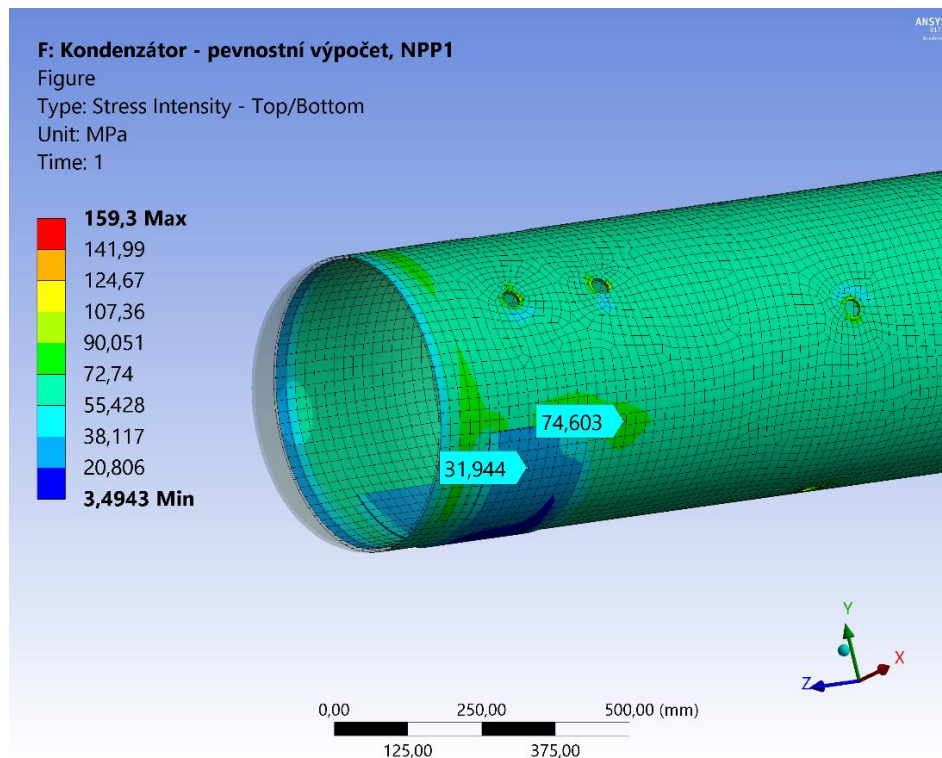
Těleso kondenzátoru je uchyceno na dvou sedlových podporách. Oblast 3 je zaměřena na obě místa spojení pláště a podložního plechu sedlové podpory. Na obr. 36 až 39 jsou zobrazena působící ekvivalentní membránová a ohybová napětí v oblasti 3. V tab. 11 až 14 jsou shrnuty hodnoty kategorizace napětí pro jednotlivé součásti.

Materiál součástí:

- Plášť – P265GH
- Podložné plechy – P235GH



Obr. 36 Ekvivalentní membránová napětí mezi pláštěm kondenzátoru a podložným plechem sedlové podpory 1



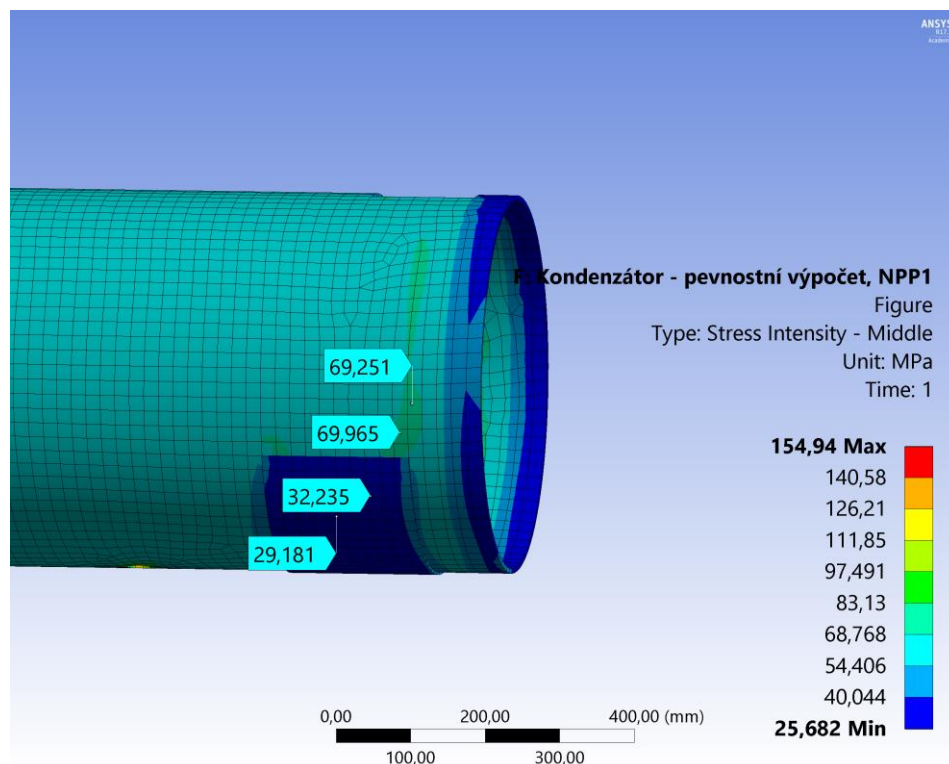
Obr. 37 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí mezi pláštěm kondenzátoru a podložným plechem sedlové podpory 1

Tab. 11 Hodnoty kategorizace napětí pro podložený plech sedlové podpory 1

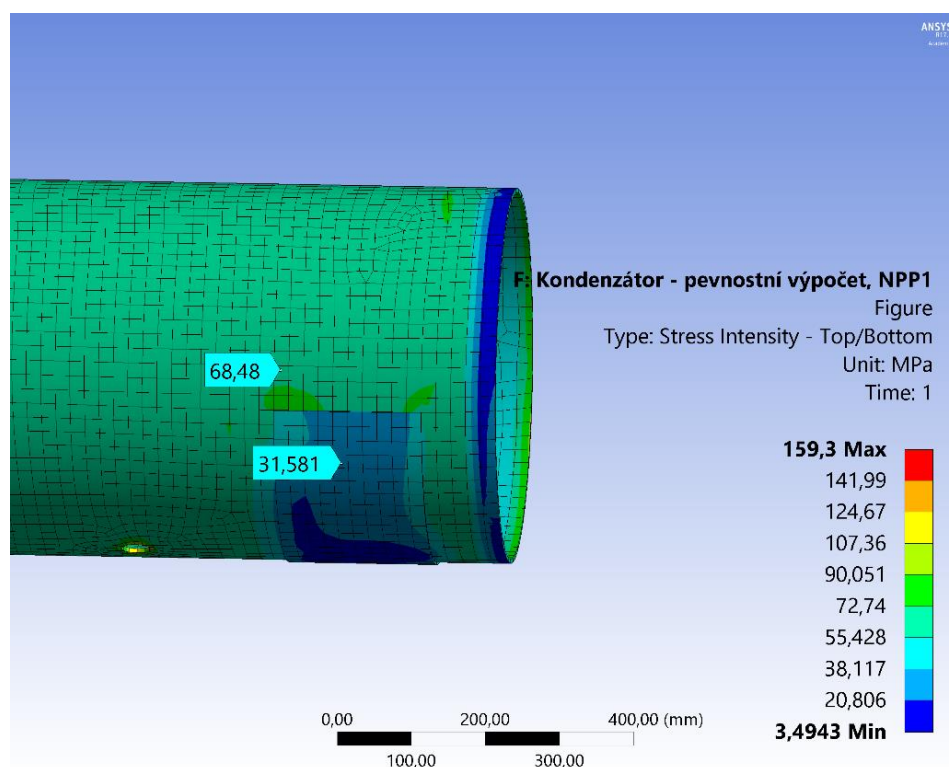
Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	30	$\leq f$	150	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	32	$\leq 1,5 f$	225	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	32	$\leq 1,5 f$	225	VYHOVUJE

Tab. 12 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť kondenzátoru

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]	Stav	
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	71	$\leq f$	134	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	69	$\leq 1,5 f$	202	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	75	$\leq 1,5 f$	202	VYHOVUJE



Obr. 38 Ekvivalentní membránová napětí mezi pláštěm kondenzátoru a podložným plechem sedlové podpory 2



Obr. 39 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí mezi pláštěm kondenzátoru a podložným plechem sedlové podpory 2

Tab. 13 Hodnoty kategorizace napětí pro podložný plech sedlové podpory 2

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	29	$\leq f$	150	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	32	$\leq 1,5 f$	225	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	31	$\leq 1,5 f$	225	VYHOVUJE

Tab. 14 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť kondenzátoru

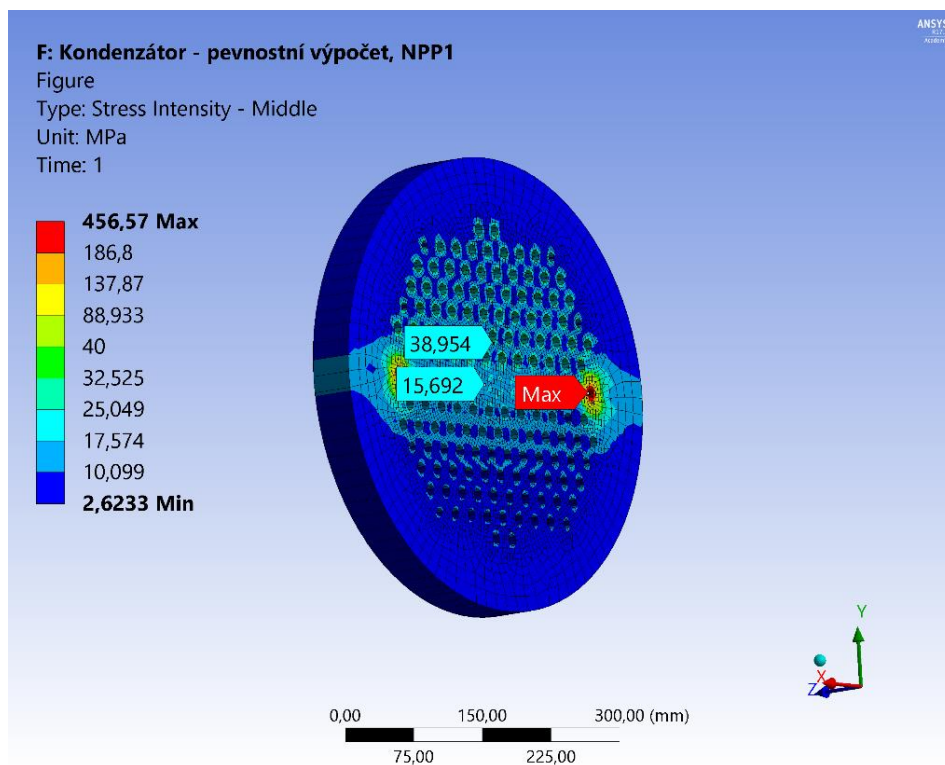
Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	69	$\leq f$	134	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	70	$\leq 1,5 f$	202	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	69	$\leq 1,5 f$	202	VYHOVUJE

Všechna primární napětí po provedení kategorizace napětí vyhovují normě ČSN EN 13445 [19].

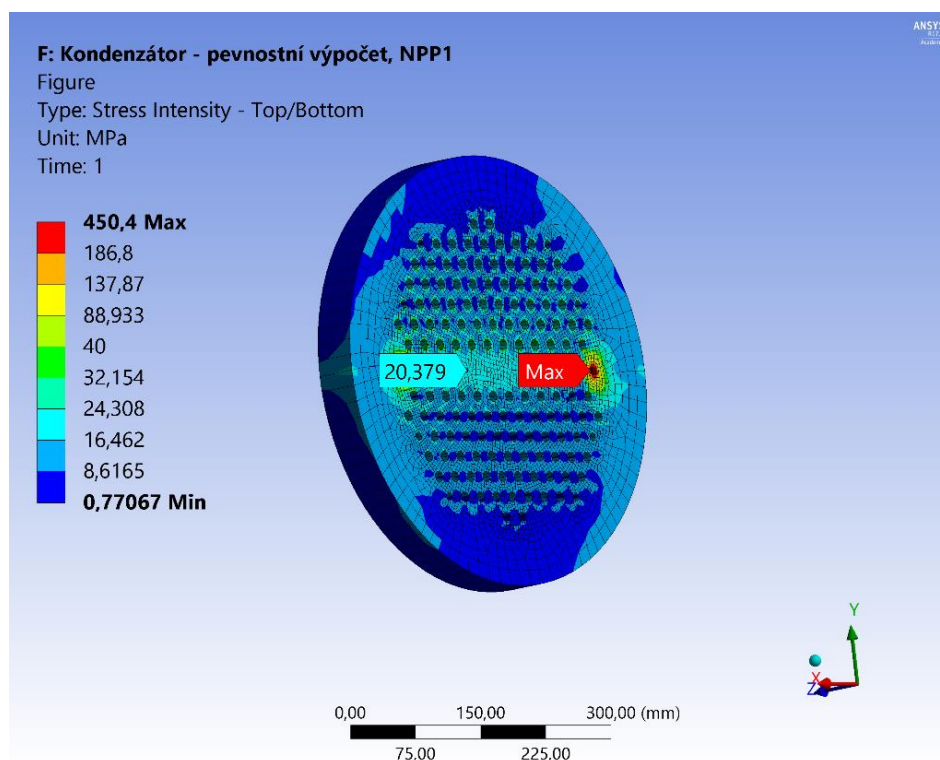
5.5.6 Oblast 4 – trubkovnice

Trubkovnice je konstrukční část kondenzátoru, ve které jsou zalisovány a přivařeny trubky svazku. Odděluje trubkový a mezitrubkový prostor. Na obr.40 jsou zobrazena působící ekvivalentní membránová napětí, dále lze na obr. 41 vidět součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí. Hodnoty kategorizace napětí pro trubkovnici jsou shrnuty v tab. 15.

Materiál trubkovnice: P265GH.



Obr. 40 Ekvivalentní membránová napětí působící v trubkovnici



Obr. 41 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí v trubkovnici

Na straně mezitrubkového prostoru byla na trubkovnici aplikována teplota 202 °C. Také se předpokládaly relativně vysoké teploty na vnějším povrchu trubek T_{W2} . Výsledné teploty T_{W2} z předchozích výpočtů nebyly tak vysoké, jak se předpokládalo. Výsledkem pevnostního výpočtu je minimální zatížení trubkovnice.

V tomto případě se na trubkovnici vyskytovaly špičky napětí. Vznikly v místech trubkovnice, kde jsou ze strany mezitrubkového prostoru uchyceny vodící tyče o předpokládané teplotě 202 °C a ze strany trubkového prostoru je uchycena přepážka komory o předpokládané nejvyšší teplotě 110 °C, oddělující vstupující a vystupující proud vody. Dané špičky napětí nemohou být vyhodnoceny pomocí tohoto modelu a i zde by bylo nezbytné provést navazující analýzy, jak bylo zmíněno výše.

U trubkovnice bylo provedeno posouzení primárních napětí. Při zanedbání špiček napětí, které zde nebudou vyhodnoceny, trubkovnice vyhovuje normě.

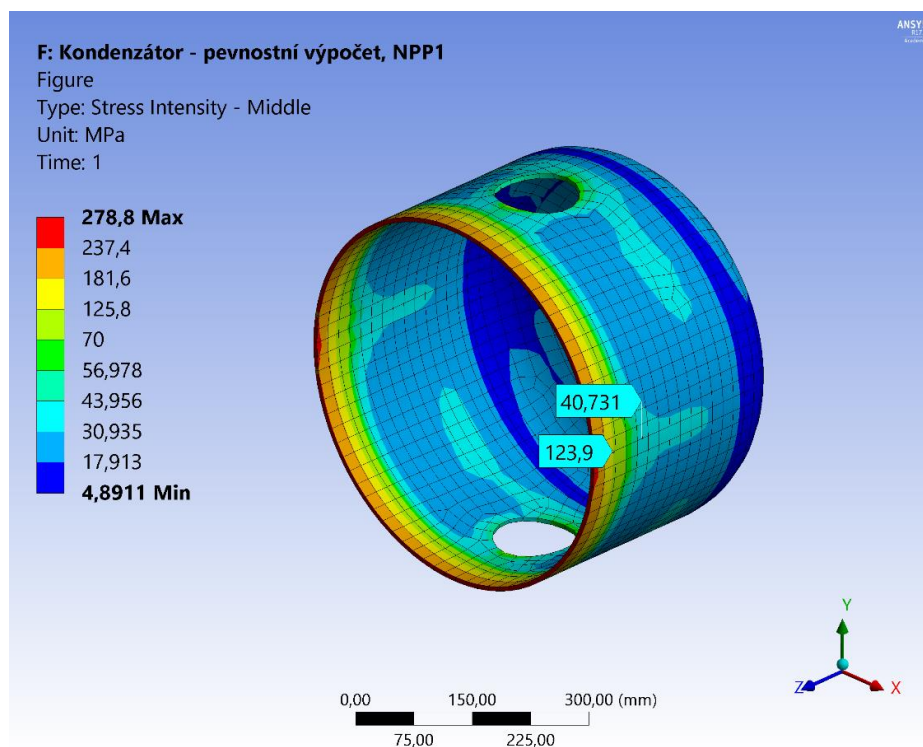
Tab. 15 Hodnoty kategorizace napětí pro trubkovnici

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]	Stav	
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	16	$\leq f$	125	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	39	$\leq 1,5 f$	187	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	20	$\leq 1,5 f$	187	VYHOVUJE

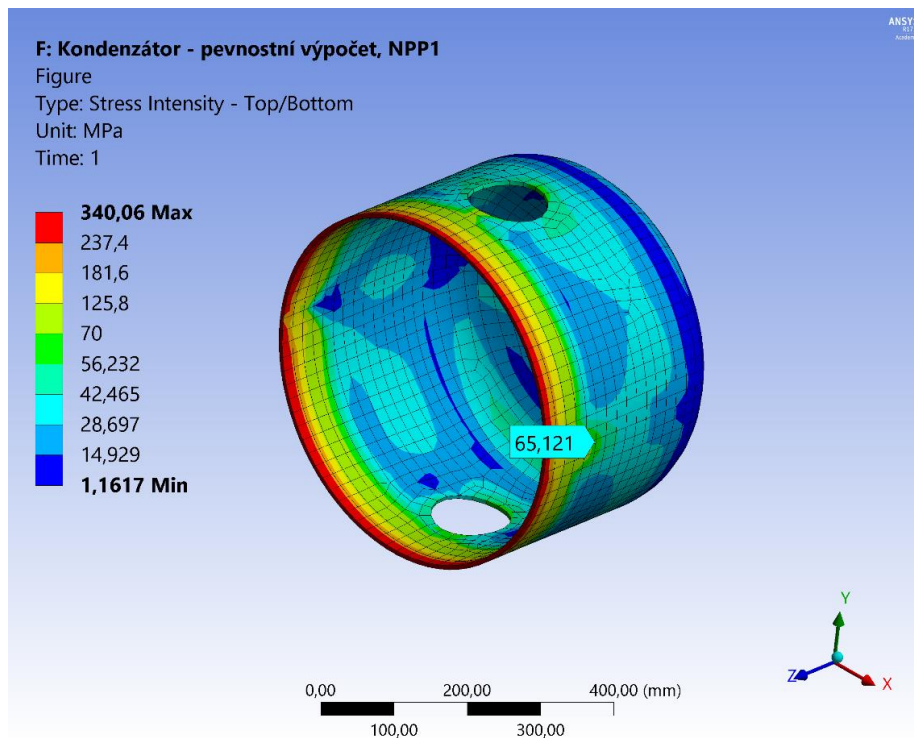
5.5.7 Oblast 5 – plášť komory

Oblast 5 je zaměřena na posouzení pláště komory. Na obr. 42 jsou zobrazena působící ekvivalentní membránová napětí, dále lze na obr. 43 vidět součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí. Tab. 16 zobrazuje výsledky kategorizace napětí pro plášť komory.

Materiál pláště komory: P265GH.



Obr. 42 Ekvivalentní membránová napětí působící v plášti komory



Obr. 43 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí v plášti komory

Tab. 16 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť komory

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	41	$\leq f$	158	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	124	$\leq 1,5 f$	237	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	65	$\leq 1,5 f$	237	VYHOVUJE

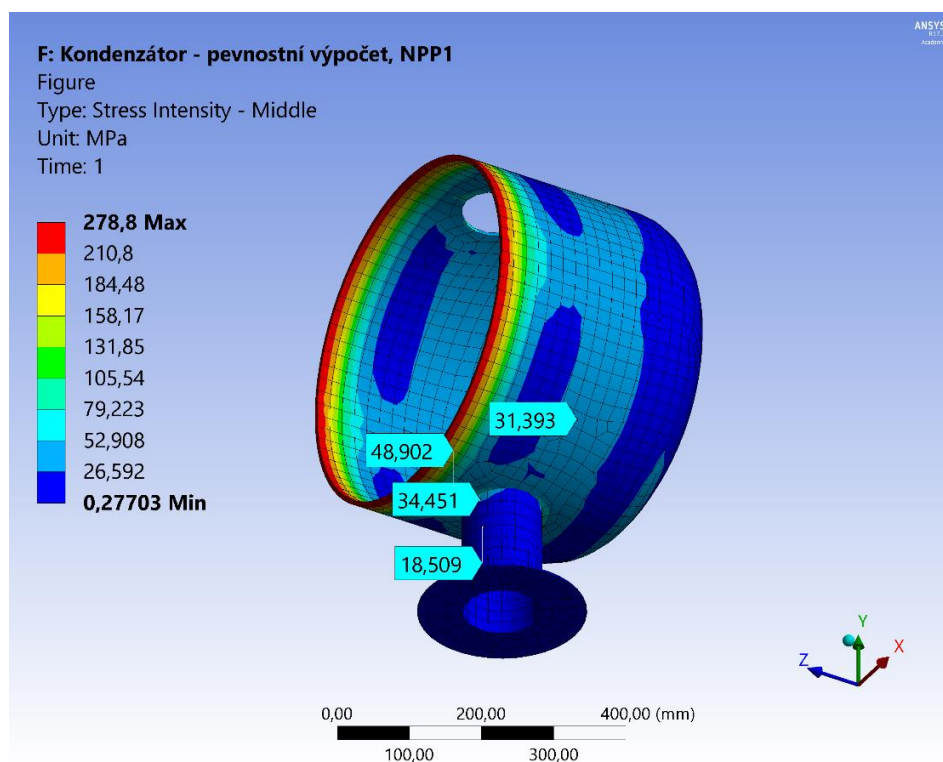
Z obr. 42 a 43 je patrné, že plášť komory je výrazně ovlivněn konstrukční diskontinuitou a bude nezbytné podrobit toto místo navazující analýze. Tyto oblasti nyní nebyly zahrnuty do kategorizace napětí. Všechna primární napětí po provedení kategorizace napětí vyhovují normě ČSN EN 13445 [19].

5.5.8 Oblast 6 – místo spojení hrdla N2, N3 s pláštěm komory

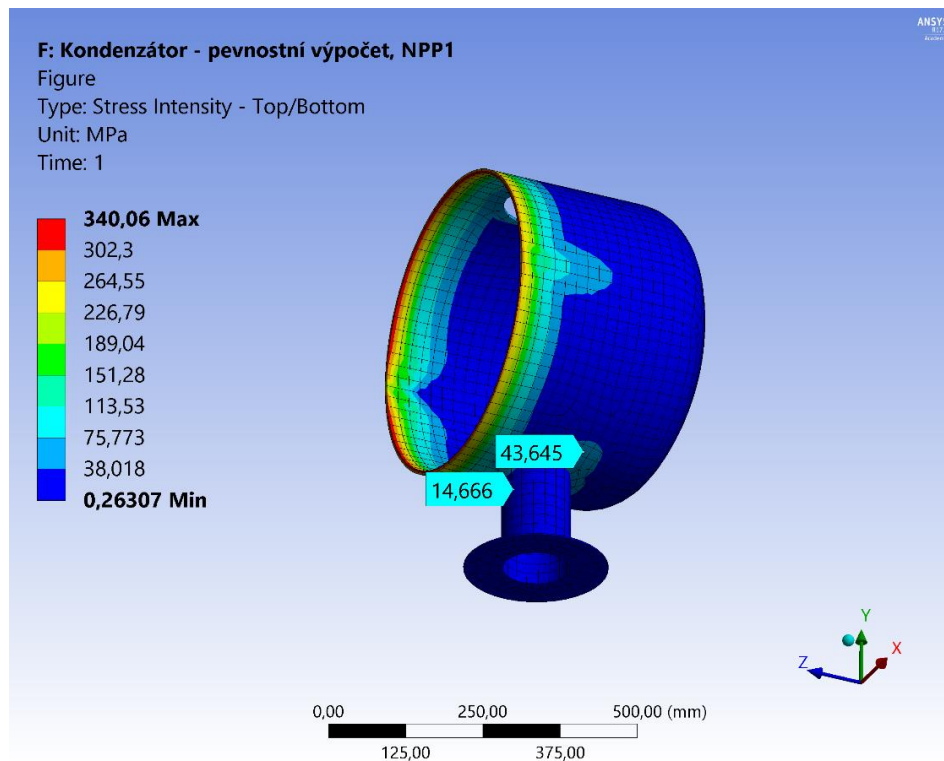
Oblast 6 je zaměřena na pevnostní analýzu konstrukčních diskontinuit v místě spojení hrdla N2 a N3 s pláštěm komory. Komora kondenzátoru je prostor, do kterého hrdlem N2 vstupuje chladicí voda, proudí trubkami a hrdle N3 vystupuje z kondenzátoru. Na obr. 44 až 47 jsou zobrazena působící ekvivalentní membránová a ohybová napětí v oblasti 6. V tab. 17 až 20 jsou shrnuty výsledky kategorizace pro dané součásti.

Materiál součástí:

- Plášť komory – P265GH
- Hrdla N2, N3 – P235GH



Obr. 44 Ekvivalentní membránová napětí mezi pláštěm komory a hrdlem N2



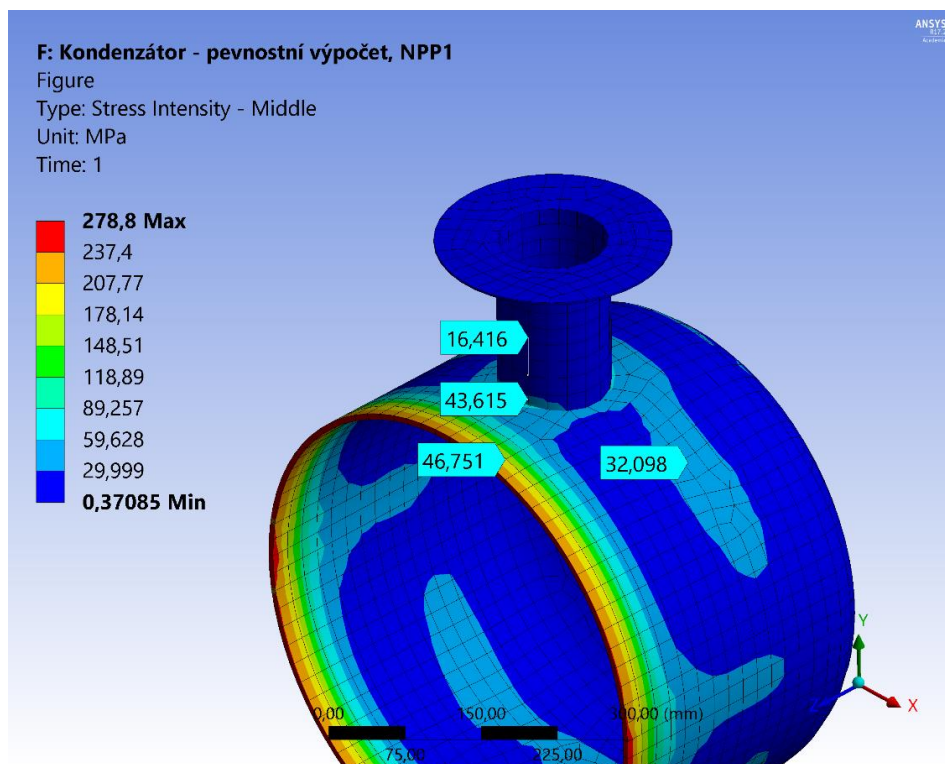
Obr. 45 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí mezi pláštěm komory a hrdlem N2

Tab. 17 Hodnoty kategorizace napětí pro hrdlo N2

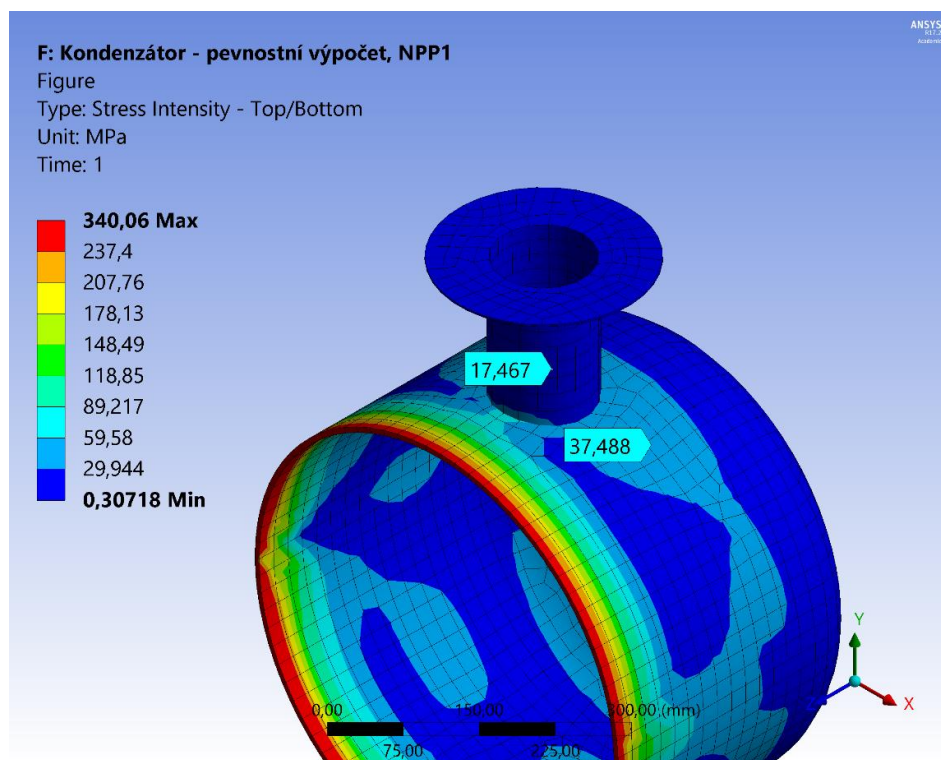
Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	19	$\leq f$	141	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	35	$\leq 1,5 f$	211	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	15	$\leq 1,5 f$	211	VYHOVUJE

Tab. 18 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť komory

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	31	$\leq f$	158	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	49	$\leq 1,5 f$	237	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	44	$\leq 1,5 f$	237	VYHOVUJE



Obr. 46 Ekvivalentní membránová napětí mezi pláštěm komory a hrdlem N3



Obr. 47 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí mezi pláštěm komory a hrdlem N3

Tab. 19 Hodnoty kategorizace napětí pro hrdlo N3

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	16	$\leq f$	141	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	44	$\leq 1,5 f$	211	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	18	$\leq 1,5 f$	211	VYHOVUJE

Tab. 20 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť komory

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]		Stav
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	32	$\leq f$	158	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	47	$\leq 1,5 f$	237	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	38	$\leq 1,5 f$	237	VYHOVUJE

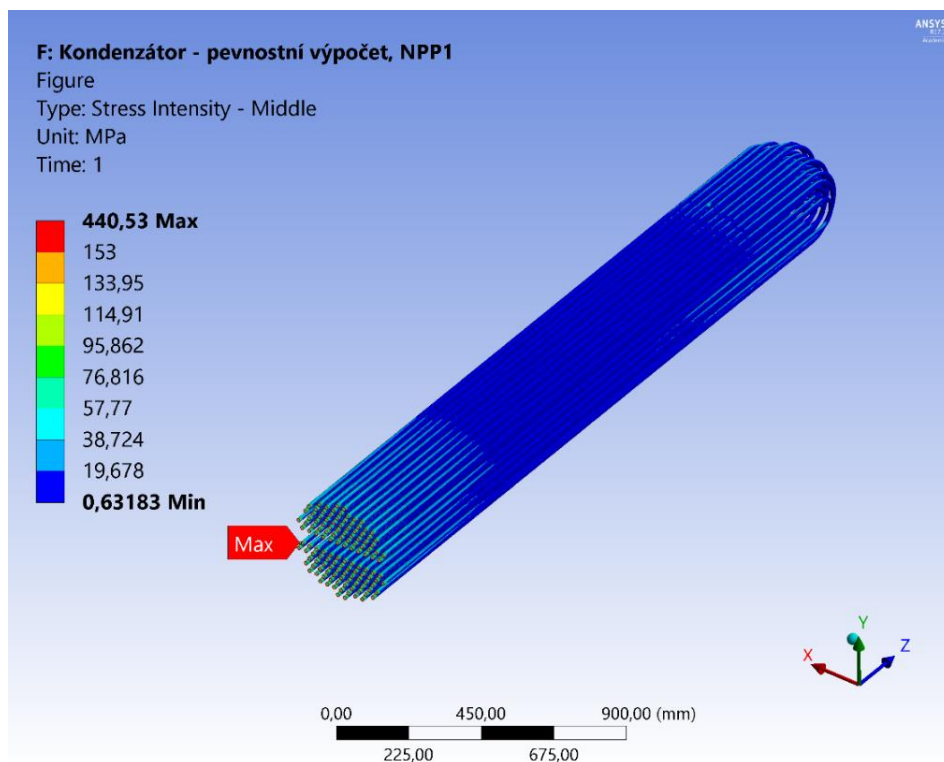
V oblasti mimo výraznou konstrukční diskontinuitu, mimo místa napojení hrdel, se většinou ekvivalentní primární napětí $(\sigma_{eq})_P$ příliš neliší od globálního membránového napětí $(\sigma_{eq})_{Pm}$. Mimo diskontinuity převládá membránové napětí. Všechna primární napětí po provedení kategorizace napětí splňují podmínky stanovené normou ČSN EN 13445 [19].

5.5.9 Oblast 7 – trubkový svazek

Trubkový svazek je tvořen U-trubkami, v každém chodu 65 trubek s vnějším průměrem 14 mm a tloušťkou stěny 1 mm.

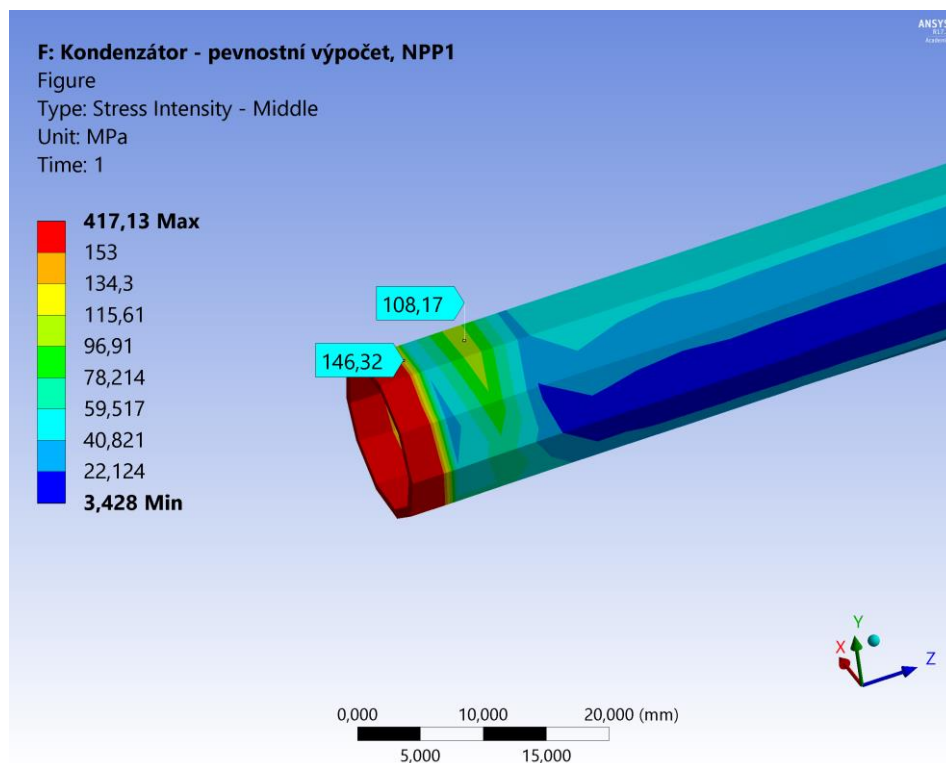
Materiál trubek: X5CrNi18-10

Trubky jsou vyrobeny z korozivzdorného materiálu, proto zde není uvažován korozní přírůstek. Na obr. 48 až 50 jsou zobrazena působící ekvivalentní membránová a ohybová napětí v trubkovém svazku. Výsledné hodnoty kategorizace napětí pro vybranou trubku jsou shrnuty v tab. 21.

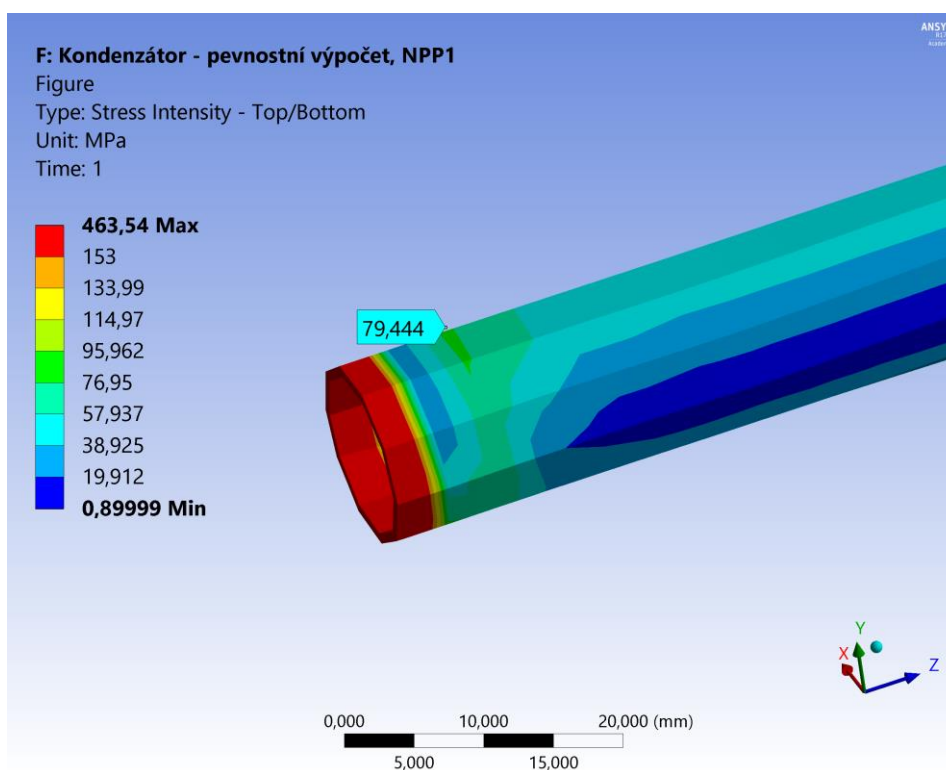


Obr. 48 Ekvivalentní membránová napětí v trubkách

I přes import teplotního pole do pevnostního výpočtu nejsou trubky z pevnostního hlediska příliš namáhány. Z velké míry je to způsobeno tvarem trubek a možností dilato-
vat v podélném směru. Níže je za účelem kategorizace napětí zaměřena pozornost pouze na jednu trubku. Byla vybrána trubka z 1. řady.



Obr. 49 Ekvivalentní membránová napětí v trubce



Obr. 50 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí na vybrané trubce

Tab. 21 Hodnoty kategorizace napětí pro 1 trubku

Kategorie	Analyzované napětí [MPa]	Limit zatížení [MPa]	Stav	
$(\sigma_{eq})_{Pm}$	108	$\leq f$	102	NEVYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_{PL}$	146	$\leq 1,5 f$	153	VYHOVUJE
$(\sigma_{eq})_P$	79	$\leq 1,5 f$	153	VYHOVUJE

Primární ekvivalentní lokální membránové napětí $(\sigma_{eq})_{PL}$ a primární napětí $(\sigma_{eq})_P$ vyhovuje podmínkám dle normy ČSN EN 13445 [19]. Posuzované místo globálního membránového napětí $(\sigma_{eq})_{Pm}$ bylo vybráno, protože se po provedení pevnostní analýzy jevílo jako nejvíce namáhané. Tento předpoklad se potvrdil a trubka v daném místě nevyhovuje podmínkám stanovených normou. Aby bylo možno tento výsledek považovat za relevantní, bylo by potřeba provést posouzení napětí při rozlišení sekundárního napětí Q a špičkového napětí F . Další možností je provedení detailního pevnostního výpočtu trubkového svazku. To ovšem není cílem této práce. Tento výsledek může sloužit jako doporučení pro další práci zabývající se touto problematikou.

Výše provedená pevnostní analýza pro NPP1 poskytuje komplexní přehled o namáhání kondenzátoru. Výsledky mohou sloužit jako relativně kvalitní základ při dalším hodnocení zařízení. Tento přístup na druhou stranu vykazuje značné nepřesnosti. Při hodnocení zařízení v praxi by bylo nutné se zaměřit na součásti s nevyhovujícími nebo nejméně příznivými výsledky. Bylo by potřeba provést tzv. submodelling.

Tato diplomová práce se zabývá komplexním pevnostním návrhem parního kondenzátoru. V další fázi nebude proveden submodelling, ale pevnostní ověření tohoto zařízení v softwaru Sant' Ambrogio.

6 Pevnostní ověření kondenzátoru v softwaru Sant' Ambrogio

Software Sant' Ambrogio slouží k pevnostnímu výpočtu jednotlivých komponent tlakových nádob podle vztahů vybraných norem, např. ČSN EN 13445, ASME Section VIII a dalších. Proto lze provedení pevnostního výpočtu v tomto softwaru považovat za ekvivalentní návrhu zařízení podle vzorců (DBF).

Výstupem pevnostního výpočtu jsou protokoly, které je software schopen vygenerovat. Ty mohou následně posloužit jako doklad o splnění požadavků normy.

Pro parní kondenzátor byl proveden pevnostní výpočet pro provozní stav NPP1 (přetlak) a NPP2 (podtlak). Rozměry a tloušťky stěn parního kondenzátoru vyhovují zadaným podmínkám. Hodnoty zkušebních tlaků (TZ) pro zadané provozní podmínky jsou již zahrnuty v těchto dvou zprávách. Výstupní zprávy jsou dostupné v příloze č. 3.

Konstrukce zařízení při stanoveném zatížení splňuje podmínky normy ČSN EN 13445.

7 Vyhodnocení výsledků, návrhy pro budoucí práci

Byl proveden návrh kondenzátoru a provedeny pevnostní analýzy. Vyhodnocení vybraných míst bez zahrnutí oblastí nevhodných k vyhodnocení na skořepinovém modelu splňují požadavky stanovené normou a nevylučují, že po provedení detailních analýz nevhodných míst bude navržená konstrukce vyhovující.

Při řešení pevnostního výpočtu zařízení je často nutné uvažovat komplexní teplotní zatížení. Pokud je teplotní pole působící na zařízení nelineární, existuje způsob, jak toto teplotní pole importovat do prostředí *ANSYS Workbench*. To lze provést pomocí hodnot vytvořených tabulkou například v programu *Microsoft Excel*. Je potřeba zadat celkem čtyři souřadnice: tři prostorové (x, y, z) a jednu pro teplotu. Tím vznikne teplotní pole v prostoru. Tuto operaci je možno provést pomocí funkce *External Data*. Následně může být pole importováno jak do teplotní, tak do strukturální úlohy, do podčásti *Setup*. Do *ANSYSu* může být tímto způsobem importováno nejen pole teplot, ale také tlak, tepelný tok, tloušťka, posunutí, síla, rychlost nebo například napětí. Dané hodnoty se následně namapují na existující síť a interpolují se hodnoty mezi danými hodnotami. Tímto přístupem je možné popsat modelovanou situaci se zvýšenou přesností a minimalizovat tak nejistoty výpočtových předpokladů (zjednodušení).

Důležitým aspektem při pevnostním výpočtu je způsob řešení kontaktů těles. Kontakty se používají v případě dvou oddělených povrchů, které se budou dotýkat. Nevýhodou je, že mohou vést na nelineární úlohy. Kontakty ztěžují řešení úlohy a prodlužují výpočtový čas. Může také nastat problém s konvergencí řešení, například kontakt typu *Frictional*. Pokud nastane problém s řešením úlohy, řešič softwaru *ANSYS Workbench* upozorní na problém v oddílu *Messages*. Problém s kontakty lze z řešiče rozpoznat například tak, že řešič oznamuje skutečnost, že některá ze součástí tělesa má tendenci posunout se neočekávaně daleko od analyzovaného tělesa. Problém s kontakty je možné vyřešit vytvořením automatických kontaktů (příkaz *Create Automatic Connections*) s relevantně nastavenými parametry kontaktní sady.

8 Závěr

Diplomová práce se zabývá komplexním pevnostním návrhem parního kondenzátoru. Za komplexní je návrh považován z hlediska provedení pevnostních výpočtů při zahrnutí teplotního pole a tak i rozšíření výpočtu dle analytických vztahů o provozní stavy, jenž by takový výpočet nepostihl. Pevnostní výpočet byl proveden více způsoby. Cílem práce bylo provést pevnostní výpočty vybraného provozního stavu, poskytnout představu o možnostech řešení, doporučení, ale také upozornit na úskalí těchto výpočtů.

V úvodní části práce je provedena literární rešerše z oblasti zařízení na výměnu tepla se zaměřením na kondenzátory.

První fázi výpočtové části práce představuje tepelně-hydraulický návrh kondenzátoru v softwaru *HTRI*. Výstupem se stalo teplotní pole v kondenzátoru, které bylo následně implementováno do pevnostního výpočtu. Při tepelně-hydraulickém návrhu je nutno dodržet více faktorů současně, například požadovaný tepelný výkon zařízení (aby například všechna pára zkondenzovala nebo aby byla voda ohřata na požadovanou teplotu) při současném dodržení doporučené rychlosti proudění v trubkách. Při nízké rychlosti média v trubkách hrozí zanášení, při příliš vysoké rychlosti hrozí naopak vibrace. Tepelný výkon kondenzátoru je 0,58 MW. Pára o hmotnostním toku 0,22 kg/s kondenzuje při teplotě 201,4 °C a následně dochází k ochlazení kondenzátu na 39,1 °C, přičemž chladicí voda o průtoku 13,5 kg/s je ohřata z 25 na 35,3 °C. Rychlost vody v trubkách je 1,84 m/s. V dalších krocích je proveden přepočet teplot na vnější povrch trubek a následně výpočet rozložení teplot pro jednotlivé řady trubek. Je přitom uvažován nejméně příznivý stav, v tomto případě nejvyšší možná teplota povrchu trubek 202 °C. Výstupní zpráva tepelně-hydraulického výpočtu je dostupná v příloze č. 1, výpočty teplot v příloze č. 2.

Navazující analýzy se věnují výpočtům dle MKP. Byl vytvořen skořepinový model (geometrie vytvořená jako střednicové plochy všech částí), navrženy tloušťky jednotlivých dílů, vytvořena síť, kontakty, vazby modelu, importováno teplotní pole, definováno zatížení tlakem a ekvivalentními silami na hrdla a vyhodnocení relevantních částí dle ČSN EN 13445-3, přílohy C – metody založené na kategorizaci napětí.

Provedené analýzy byly dále vyhodnoceny v rozsahu stanoveném pro potřeby této práce. Pro tyto potřeby byl využit skořepinový model, který má určité limity. V práci byly tyto limity diskutovány a navrženy následující činnosti, které tyto problémová místa eliminují a umožní plnohodnotné posouzení všech míst konstrukce.

Při návrhu zařízení je v první řadě nutno zvážit, jakým způsobem bude zařízení vyhodnoceno. Je vhodné volit kombinaci řešení návrhu dle vzorců, analýzy a experimentu (DBF, DBA, DBE) tak, aby byl zajištěn bezpečný návrh zařízení a zohledněny všechny významné provozní stavy z hlediska bezpečnosti a životnosti.

Konstrukce a analyzované tloušťky jednotlivých komponent byly dále ověřeny za pomocí návrhu dle analytických vztahů s využitím komerčního certifikovaného softwaru Sant' Ambrogio. Výstupem těchto výpočtů jsou protokoly, které jsou obsaženy v příloze č. 3.

Práce je zakončena návrhy pro možnou navazující práci, které by dále zpřesnily prováděné analýzy a umožnily přiblížit se s výsledky reálnému zatěžování zařízení v provozu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] PERRY, Robert H. a Don GREEN. *PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK*. 8th edition. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-142294-9.
- [2] ŠKORPÍK, Jiří. Technická termomechanika, *Transformační technologie*, 2013-06, [last updated 2016-03-03]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/technicka-termomechanika.html>.
- [3] STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan NĚMČANSKÝ. *Tepelné pochody: Výpočet výměníku tepla*. Brno: VUT Brno, 1991. ISBN 80-214-0363-2.
- [4] TRNKA, M. Předmět: Aplikovaná bioklimatologie. In: *Docplayer.cz* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11272834-Predmet-aplikovana-bioklimatologie.html>
- [5] THULUKKANAM, Kuppan. *Heat Exchanger Design Handbook*. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 9781138074668.
- [6] *Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.tema.org/index.html>
- [7] TEMA – Type. In: *RAMAB: Specialists in piping constructions and heat exchangers* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.ramab.se/uploads/varmevaxlare.jpg>
- [8] KAKAÇ, Sadik a Hongtan LIU. *HEAT EXCHANGERS: SELECTION, RATING and THERMAL DESIGN*. 2nd Edition. CRC PRESS, 2002. ISBN 0-8493-0902-6.
- [9] FILKOVÁ, Iva. *Tepelné pochody – příklady výpočtů I*. Dotisk. České vysoké učení technické v Praze: Ediční středisko ČVUT, 1987.
- [10] SERTH, Robert a Thomas LESTINA. *Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb* [online]. 2nd Edition. Academic Press, 2014 [cit. 2017-04-21]. ISBN 978-0-12397-792-2.
- [11] MCNAUGHT, J.M-. *CONDENSERS*. *Thermopedia* [online]. 2011 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/654/>
- [12] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Parní turbíny a kondenzace*. Vysoké učení technické v Brně: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1987.
- [13] API Heat Exchangers. *Hitchings design: 3D illustration & animation* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://hitchingsdesign.com/portfolio/api-heat-exchangers/>
- [14] Condensers. *Doosan Škoda Power* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.doosanskodapower.com/en/heat/condensers.do>
- [15] HTRI Xchanger Suite. *HTRI* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://www.htri.net/htri-xchanger-suite>

- [16] TCONSULT. *TLAKOVÁ ZAŘÍZENÍ – PEVNOSTNÍ VÝPOČTY: Metody pevnostních výpočtů tlakových zařízení podle současných světově uznávaných předpisů*. Brno, 2006.
- [17] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/68/EU: O harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání tlakových zařízení na trh*. In: . 2014, ročník 2014. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0068>
- [18] Předpisy a normy. *TConsult: PORADENSKÁ A KONZULTAČNÍ ČINNOST – tlakové a beztlakové nádoby a zařízení* [online]. Brno [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: http://www.tconsult-brno.cz/tc_main/p_predpisy.htm#EN764
- [19] ČSN EN 13445 - *Netopené tlakové nádoby*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [20] ČSN EN 764-1 - *Tlaková zařízení - Část 1: Slovník*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [21] PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech*. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Dostupné také z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011.pdf>
- [22] *Metoda konečných prvků*. Dostupné také z: http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/MKP4.pdf
- [23] The Finite Element Method - Theory. *Marine technology* [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://illustrations.marin.ntnu.no/structures/analysis/FEM/theory/index.html>
- [24] Workbench Platform. ANSYS [online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/products/platform>

Seznam symbolů a veličin

Symbol	Veličina	Jednotka
c	Přídavek na korozi nebo erozi	mm
e	Požadovaná tloušťka	mm
e _a	Analyzovaná tloušťka	mm
e _{ex}	Tloušťka přidaná navíc pro doplnění na jmenovitou tloušťku	mm
e _{min}	Minimální přijatelná výrobní tloušťka	mm
e _n	Jmenovitá tloušťka	mm
f	Dovolené namáhání	MPa
f _a	Dovolené namáhání při zkušební teplotě	MPa
f _d	Maximální hodnota dovoleného namáhání pro běžné provozní zatížení	MPa
f _{Td}	Dovolené namáhání při teplotě T _d	MPa
f _{test}	Maximální hodnota dovoleného namáhání pro zkušební zatížení	MPa
L	Vzdálenost od místa diskontinuity	mm
n _{eq}	Ekvivalentní počet plných tlakových cyklů	-
n _i	Počet tlakových cyklů	-
P	Primární napětí	MPa
P _d	Konstrukční tlak pro případ nejvyššího zatížení tlakem	MPa
P _L	Lokální primární membránové napětí	MPa
P _m	Globální primární membránové napětí	MPa
P _{max}	Maximální přípustný tlak vypočtený pro celou nádobu pro případ normálního provozního zatížení	MPa
P _s	Maximální dovolený tlak nádoby	MPa
P _t	Zkušební tlak měřený v nejvyšším bodě komory nádoby ve zkušební poloze	MPa
q̇	Tepelný tok	W·m ⁻²
R	Poloměr zakřivení skořepiny	mm
R _{m/20}	Minimální mez pevnosti v tahu při teplotě 20 °C	MPa
R _{p0,2/t}	Minimální smluvní mez kluzu 0,2 % při teplotě t °C	MPa
R _{p0,2/t test}	Minimální smluvní mez kluzu 0,2 % při zkušební teplotě t °C	MPa

Symbol	Veličina	Jednotka
T_{\max}	Nejvyšší teplota v daném místě	$^{\circ}\text{C}$
T_{mean}	Střední teplota v daném místě	$^{\circ}\text{C}$
T_{\min}	Nejnižší teplota v daném místě	$^{\circ}\text{C}$
T_{W1}	Teplota stěny na vnitřním povrchu trubky	$^{\circ}\text{C}$
T_{W2}	Teplota stěny na vnějším povrchu trubky	$^{\circ}\text{C}$
x	Poměr teplot	-
δ	Tloušťka stěny trubky	mm
δ_m	Přídavek na možné zeslabení během výrobního procesu	mm
ΔP_i	Rozkmit tlaku	MPa
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
$(\sigma_{\text{eq}})_P$	Ekvivalentní primární napětí	MPa
$(\sigma_{\text{eq}})_{PL}$	Ekvivalentní lokální primární membránové napětí	MPa
$(\sigma_{\text{eq}})_{Pm}$	Ekvivalentní globální primární membránové napětí	MPa

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma vyjadřující výměnu tepla [3]	16
Obr. 2 Tři typy přenosu tepla [4].....	17
Obr. 3 Základní rozdělení zařízení na výměnu tepla [3].....	18
Obr. 4 Konstrukční řešení U-trubkového výměníku tepla [5]	20
Obr. 5 Části trubkových výměníků tepla dle standardu TEMA [7]	21
Obr. 6 Směšovací kondenzátor [10]	22
Obr. 7 Kondenzátor válcového tvaru [12].....	23
Obr. 8 Kondenzátor hranolovitého tvaru [13]	24
Obr. 9 Horizontální kondenzátor s kondenzací v mezitrubkovém prostoru [9]	25
Obr. 10 Horizontální kondenzátor s kondenzací v trubkovém prostoru [9].....	26
Obr. 11 Vertikální kondenzátor s kondenzací v mezitrubkovém prostoru [9].....	26
Obr. 12 Vertikální kondenzátor s kondenzací v trubkovém prostoru [9].....	27
Obr. 13 Skořepinový model kondenzátoru.....	28
Obr. 14 Sestava kondenzátoru a popis jeho hlavních částí	29
Obr. 15 Procesní schéma kondenzátoru	31
Obr. 16 Souhrn výsledků tepelně-hydraulického výpočtu	32
Obr. 17 Schéma příčného řezu trubkového svazku.....	33
Obr. 18 Schéma výsledku výpočtu okrajových teplot na vnějším povrchu trubek.....	35
Obr. 19 Vztahy mezi PED 2014/68/EU a normativními předpisy [16]	36
Obr. 20 Vztah mezi definicemi tloušťek [19]	38
Obr. 21 Schematické znázornění tlaků [20]	39
Obr. 22 Nejčastěji používané typy prvků u MKP [23]	43
Obr. 23 Síť modelu tělesa kondenzátoru.....	46
Obr. 24 Aplikace vstupních teplot prvního chodu pro řady 1-7.....	48
Obr. 25 Průřez kondenzátorem zobrazující výsledné teplotní zatížení kondenzátoru	49
Obr. 26 Geometrické okrajové podmínky kondenzátoru pro pevnostní výpočet	52
Obr. 27 Kondenzátor zatížený vnitřním tlakem	53
Obr. 28 Hrdla kondenzátoru zatížena ekvivalentními silami	54
Obr. 29 Ekvivalentní napětí na tělese parního kondenzátoru.....	55
Obr. 30 Deformace trubkového svazku v podélném směru	55
Obr. 31 Zobrazení oblastí vybraných pro kategorizaci napětí	56
Obr. 32 Ekvivalentní membránová napětí působící v místě spoje hrdla N1 s torosférickým dnem	57
Obr. 33 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí působící v místě spoje hrdla N1 s torosférickým dnem	58
Obr. 34 Ekvivalentní membránová napětí působící v plášti kondenzátoru.....	59
Obr. 35 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí v plášti kondenzátoru	60
Obr. 36 Ekvivalentní membránová napětí mezi pláštěm kondenzátoru a podložným plechem sedlové podpory 1	61
Obr. 37 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí mezi pláštěm kondenzátoru a podložným plechem sedlové podpory 1	62
Obr. 38 Ekvivalentní membránová napětí mezi pláštěm kondenzátoru a podložným plechem sedlové podpory 2.....	63
Obr. 39 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí mezi pláštěm kondenzátoru a podložným plechem sedlové podpory 2	63
Obr. 40 Ekvivalentní membránová napětí působící v trubkovnici.....	65

Obr. 41 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí v trubkovnici	66
Obr. 42 Ekvivalentní membránová napětí působící v plášti komory	67
Obr. 43 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí v plášti komory ...	68
Obr. 44 Ekvivalentní membránová napětí mezi pláštěm komory a hrdlem N2	69
Obr. 45 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí mezi pláštěm komory a hrdlem N2	70
Obr. 46 Ekvivalentní membránová napětí mezi pláštěm komory a hrdlem N3	71
Obr. 47 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí mezi pláštěm komory a hrdlem N3	71
Obr. 48 Ekvivalentní membránová napětí v trubkách	73
Obr. 49 Ekvivalentní membránová napětí v trubce	74
Obr. 50 Součet ekvivalentního membránového a ohybového napětí na vybrané trubce 74	

Seznam tabulek

Tab. 1 Základní zadané parametry kondenzátoru	28
Tab. 2 Geometrické charakteristiky kondenzátoru	29
Tab. 3 Materiál jednotlivých konstrukčních částí.....	30
Tab. 4 Znázornění posuzovacích kritérií dle přílohy C normy ČSN EN 13445-3 [19]..	41
Tab. 5 Teploty definované na jednotlivých částech kondenzátoru.....	47
Tab. 6 Teploty aplikované na trubkový svazek	48
Tab. 7 Zátěžné okrajové podmínky pro stav NPP1	52
Tab. 8 Hodnoty kategorizace napětí pro hrdlo N1.....	58
Tab. 9 Hodnoty kategorizace napětí pro torosférické dno.....	58
Tab. 10 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť kondenzátoru	60
Tab. 11 Hodnoty kategorizace napětí pro podložný plech sedlové podpory 1	62
Tab. 12 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť kondenzátoru	62
Tab. 13 Hodnoty kategorizace napětí pro podložný plech sedlové podpory 2.....	64
Tab. 14 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť kondenzátoru	64
Tab. 15 Hodnoty kategorizace napětí pro trubkovnici	66
Tab. 16 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť komory	68
Tab. 17 Hodnoty kategorizace napětí pro hrdlo N2.....	70
Tab. 18 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť komory	70
Tab. 19 Hodnoty kategorizace napětí pro hrdlo N3.....	72
Tab. 20 Hodnoty kategorizace napětí pro plášť komory	72
Tab. 21 Hodnoty kategorizace napětí pro 1 trubku	75

Seznam příloh

Přílohy jsou dodány na přiloženém CD.

Příloha 1 Výstupní zpráva z tepelně-hydraulického výpočtu v softwaru HTRI

Příloha 2 Výpočet teplot na vnějším povrchu trubek T_{w2} v programu Microsoft Excel

Příloha 3 Výstupní protokol z pevnostního výpočtu v softwaru Sant' Ambrogio

Příloha 3 představuje dvě výstupní zprávy pevnostního výpočtu kondenzátoru. Z důvodu rozsahu zpráv (každá přes 150 stran) jsou tyto přiloženy k diplomové práci jako samostatné soubory.

Tato práce vznikla za podpory a na přístrojovém vybavení NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I”.

This thesis was elaborated with support and by using research equipment of NETME Centre, regional research and development centre, built with the financial support from the Operational Programme Research and Development for Innovations within the project NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 and in the follow-up sustainability stage, financially supported through NETME CENTRE PLUS (LO1202) by the Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Programme I”.